

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

**Návrh efektivních soustružnických strategií pro  
obrábění Inconelu**

**Proposal of Efficient Turning Strategies for Machining  
Inconel**

**Student**

**Bc. Michal Koniuch**

**Vedoucí diplomové práce**

**Ing. Marek Pagáč, Ph.D.**

**Ostrava 2016**

## Mistopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě ..... 16.5.2016 .....

.....  


podpis studenta

Prohlašuji, že

byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.

beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB – TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odstavec 3).


souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB – TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO.

bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odstavec 4 autorského zákona.

bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB- TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/198 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě .....16.5.2016



.....  
podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Michal Koniuch

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Na Polanech 19a/331,  
Havířov-Životice, 73601

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Michal Koniuch**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie  
Specializace: 20 Strojírenská technologie  
Téma: **Návrh efektivních soustružnických strategií pro obrábění Inconelu**  
**Proposal of Efficient Turning Strategies for Machining Inconel**

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Rozbor problematiky a současný stav.
3. Návrh soustružnických strategií.
4. Experimentální testování navržených strategií.
5. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] SADÍLEK, M. *CAM systémy v obrábění I. - II. doplněné vydání*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2010. 138 s. ISBN 978-80-248-2278-4.  
<http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO>. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [2] SONETECH s.r.o. *Integrovaný programovací systém pro číslicově řízené stroje - EdgeCAM - Frézování – EdgeCAM intelligent manufacturing*. Uživatelská příručka, 2005. 80 s.
- [3] VLACH, B. *Technologie obrábění na číslicově řízených strojích*. Praha : SNTL Praha, 1982. 395 s.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Marek Pagáč, Ph.D.**

Datum zadání: 11.12.2015

Datum odevzdání: 16.05.2016



  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petřů, Ph.D.  
vedoucí katedry

  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

## Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval svému vedoucímu panu Ing. Markovi Pagáčovi, Ph.D. a konzultantovi panu Ing. Tomáši Zlámalovi, Ph.D. za rady a informace ke zpracování diplomové práce. Dále své rodině za podporu a ohleduplnost po celou dobu vysokoškolského studia.

## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

KONIUCH, M. *Návrh efektivních soustružnických strategií pro obrábění Inconelu*. Ostrava: Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, Fakulta strojní, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2016, Diplomová práce, vedoucí práce: PAGÁČ, M.

Diplomová práce se zaměřuje na studium obrábění slitin niklu. Vzhledem k chemickým vlastnostem materiálu a jeho tvrdosti je tato slitina řazena mezi materiály těžkoobrobitelné. Tato práce se v teoretické části zabývá slitinou niklu, dále podrobněji materiálem Inconel 625. V praktické části jsou popsány navržené strategie obrábění pro podélné soustružení této slitiny. V laboratoři se tyto strategie uskutečnily na CNC soustružnickém centru DMG Mori NLX 2500, u kterých se dynamometrem měřily síly působící na řezný nástroj pro každou strategii zvlášť.

**Klíčová slova:** obrábění, soustružení, Inconel, slitiny niklu, superslitiny

## ANOTATION OF THESIS'S WORK

KONIUCH, M. *Proposal of Efficient Turning Strategies for Machining Inconel*. Ostrava: Department of machining, assembly and metrology Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Technical University of Ostrava, 2016, Thesis head: PAGÁČ, M.

The thesis focuses on the study of machining nickel alloys. Due to the chemical properties and the hardness of this material, this alloy is ranked amongs Hardly-machinable materials. Theoretical part of this Thesis dealing with nickel alloys, specifically with material Inconel 625. In the practical part are described suggested machining strategies for longitudinal turning of this alloy. These strategies were accomplished in the laboratory on CNC Turning Center DMG Mori NLX 2500, at which were measured forces, acting on the cutter for every strategy separately, by dynamometer.

**Key words:** machining, turning, Inconel, nickel alloys, superalloys

## Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů .....	12
Úvod .....	14
1. Obrobitelnost .....	15
1.1 Těžkoobrobitelné materiály .....	19
1.2 Obrobitelnost těžkoobrobitelných materiálů .....	21
2. Superslitiny .....	22
2.1 Superslitiny niklu a jejich charakteristiky .....	22
2.2 Vliv jednotlivých prvků na strukturu a vlastnosti Ni slitin .....	23
2.3 Inconel.....	25
2.4 Řezné nástroje .....	26
2.4.1 Rychlořezné oceli .....	26
2.4.2 Slinuté karbidy.....	26
2.4.3 Řezná keramika a kubický nitrid boru.....	27
2.5 Obrábění velmi tvrdých materiálů .....	27
2.5.1 Směsná keramika se submikronovou strukturou .....	28
2.5.2 Deformační zpevnění.....	28
3. Řezné síly.....	30
4. Experimentální část.....	33
4.1 Volba obráběcího stroje .....	35
4.2 Volba řezného nástroje.....	36
4.3 Volba nožového držáku.....	37
4.4 Měřicí aparatura .....	37
4.5 Volba řezných podmínek .....	39
4.5.1 Řezné parametry .....	40
4.5.2 Nastavení úhlu hlavního ostří $\kappa_r$ .....	40
4.5.3 Keramika – snížení opotřebení .....	42

4.5.4	Test 1 – Přímý nájezd .....	45
4.5.5	Test 2 – Nájezd pod úhlem .....	47
4.5.6	Test 3 – Nájezd pod rádiusem .....	49
4.5.7	Test 4 – Proměnná hloubka podélného řezu 0,5 – 1mm .....	51
4.5.8	Test 5 – Proměnná hloubka podélného řezu 1 – 2 mm .....	54
4.5.9	Test 6 – Vlnová dráha nástroje .....	57
5.	Závěr .....	61



## Seznam použitých zkratk a symbolů

A	tažnost	[%]
$a_p$	radiální hloubka řezu	[mm]
CAM	Computer Aided Manufacturing – poč. podpora výroby	[–]
CBN	kubický nitrid bóru	[–]
$C_{Fc}$	konstanta z empirického vtahu pro výpočet síly	[–]
CNC	Computer Numeric Control – poč. číslicové řízení	[–]
$c_p$	měrné teplo	[J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
DAQ	digitálně analogový převodník	[–]
f	posuv	[N]
F	síla	[N]
$F_c$	řezná síla	[N]
$F_f$	posuvová síla	[N]
$F_p$	pasivní síla	[N]
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kyselina sírová	[–]
HB	tvrdost podle Brinella	[–]
HCL	kyselina chlorovodíková	[–]
$h_{ex}$	tloušťka třísky	[mm]
HRSA	Heat Resistant Alloys – žáruvzdorné slitiny	[–]
iC	průměr břitové destičky	[mm]
$k_c$	měrný odpor	[MPa]
R	řezný odpor	[MPa]
R <sub>m</sub>	mez pevnosti	[MPa]
R <sub>p</sub>	mez kluzu	[MPa]

SH2	směsná keramika	[–]
SiAlON	sialonová třída	[–]
SiCw	whiskery karbidu křemíku	[–]
SK	slinutý karbid	[–]
$x_{fc}$	exponent z empirického vztahu pro výpočet řezné síly	[–]
$y_{Fc}$	exponent z empirického vztahu pro výpočet řezné síly	[–]
$z_{Fc}$	empirická konstanta	[–]
VBD	vyměnitelná břitová destička	[–]
$v_c$	řezná rychlost	$[m \cdot min^{-1}]$
$\alpha$	teplotní součinitel roztažnosti	$[K^{-1}]$
$\Phi$	úhel stříhu	$[^{\circ}]$
$\gamma$	základní matrice	[–]
$\gamma'$	sekundární vytvrzující fáze gama	[–]
$\lambda$	tepelná vodivost	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
$\rho$	hustota	$[g \cdot cm^{-3}]$
$\sigma$	fáze matrice	[–]
$\kappa_r$	úhel nastavení	$[^{\circ}]$
$\psi$	rozdílový úhel	$[^{\circ}]$

## Úvod

V posledních desetiletích je kladen důraz na vývoj a kvalitu technologie obrábění, která je nezastupitelná ve strojírenském průmyslu. Nové technologie v kombinaci s dalšími metodami obrábění dosahují příznivým výsledků, mající vliv na trvanlivost a životnost nástrojů a na optimální řezné podmínky. Nově navrhované analýzy a experimenty v třískovém obrábění dosahují významných inovací v řezných procesech, a proto je potřeba nadále tyto aspekty rozvíjet.

Obrábění těžkoobrobitelných materiálů se rozvíjí s vývojem ostatních technických zařízení, která tyto materiály využívají. Superslitiny splňují určité požadavky, jako je žárupevnost, žáruvzdornost a korozivzdornost za zvýšených provozních teplot. Tyto slitiny nejsou výjimečně tvrdé, ale jedná se o jejich schopnost zachovávat si vysokou pevnost a houževnatost i za zvýšených teplot, což má nepříznivý vliv při obrábění. Obrábění superslitin je i v dnešní technologii problematické a klade se veliký důraz na každý aspekt ovlivňující technologii výroby (obráběcí stroje, zvolená strategie, řezné nástroje, řezné podmínky atd.). Jedná se o zhoršenou obrobitelnost, která je právě spojována s obráběním superslitin, s tím jsou spojené fyzikální a mechanické vlastnosti, které zajišťují chemické složení a složitá mikrostruktura materiálu. Zhoršená obrobitelnost nepříznivě ovlivňuje celý proces obrábění, čímž je spojené zvýšené namáhání na soustavu S-N-O, což se projevuje v kvalitě obráběných součástí, produktivitě a hospodárnosti výroby. [1]-[2]-[9]

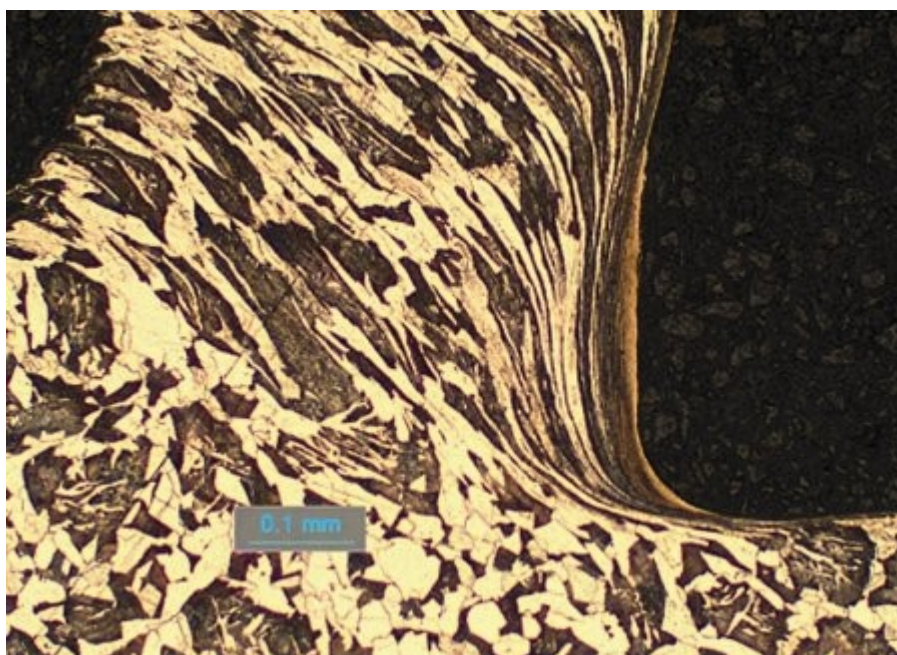
Cílem této diplomové práce je návrh soustružnických strategií při obrábění niklové slitiny Alloy 625 a měření řezných sil. K jejich měření byl použit dynamometr zn. KISTLER a software DynoWare k vyhodnocení naměřených dat, které jsou součástí vybavení Laboratoře obrábění na Katedře obrábění, montáže a strojírenské metrologie, Fakulta strojní, VŠB-Tu Ostrava.

# 1. Obrobitelnost

Obrábění kovů je technologický proces, během kterého se odebírá materiál a vytváří požadovaný tvar obráběného předmětu neboli obrobku. Během obrábění materiálu je řezná hrana velikou silou vtlačována do obrobku a ten je tak silně deformovaný, až se odděluje ve tvaru třísek. Za výsledek se bere opracovaný povrch materiálu se splněnými kvalitativními požadavky.

## Systémová vlastnost

V technologii obrábění kovů je obrobitelnost velice rozšířený výraz. Je to vyjadřující systémová vlastnost efektivity obrábění, které je dáno nízkými náklady a za daných technologických podmínek. I když je obrobitelnost ovlivněna mnoha faktory (materiál obrobku, řezné nástroje a řezné podmínky, strojní vybavení, strategie řezného procesu (CAM), upnutí obrobků a nástrojů, způsob chlazení, odborné znalosti technologů atd.), obvykle se hovoří o obrobitelnosti jako o vlastnosti materiálu. Na obr. 1.1 je uvedeno pěchování třísky při soustružení.



*Obr. 1.1 Obrábění kovů je technologický proces, při kterém se odebráním materiálu vytváří požadovaný tvar obráběného předmětu (pěchování třísky). [3]*

Je několik příčin, které způsobují, že obrobitelnost nerezových ocelí, vysoce legovaných slitin a titanových slitin se liší od ocelí, které jsou v současném světě obrábění kovů stále považovány za referenční materiály. Musí se chápat, že obrobitelnost

referenčních materiálů v porovnání s ocelmi nemusí být brána jako nižší, ale jako odlišná. Co se týče efektivity výroby, i ta může být maximalizována pro tyto materiály.

### **Kvantifikace**

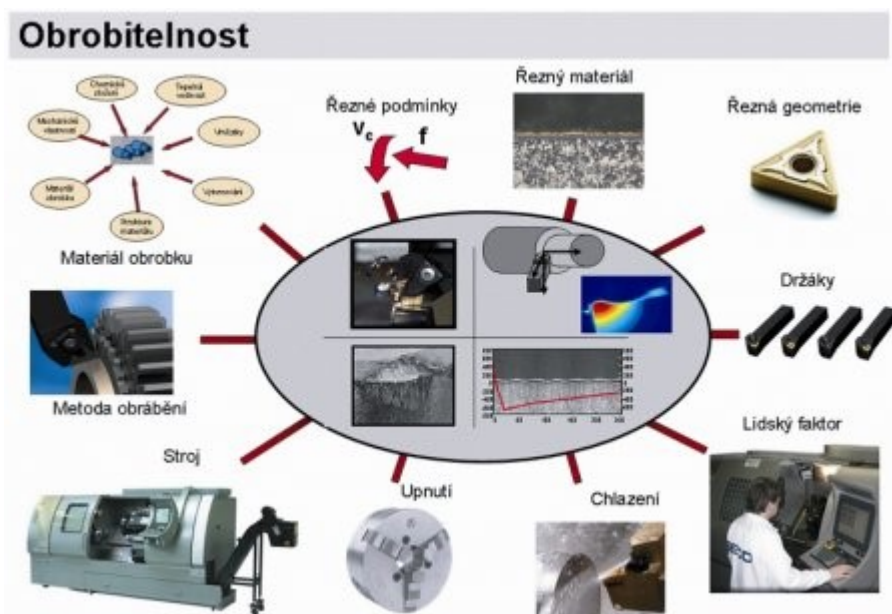
Existují kvantitativní měřítka pro posouzení obrobitelnosti jako např. index obrobitelnosti, což je průměrné hodnocení ve srovnání s referenčními materiály. Životnost nástroje, což je provozní čas v minutách nebo čas do úplného opotřebení nástroje při určitých řezných parametrech či množství odebraného materiálu před úplným opotřebením řezné hrany. Dále kvalita povrchu při standardizovaných řezných podmínkách a další, jako jsou řezné síly a výkon, teplota, utváření třísky, aspekty životního prostředí atd. Tyto kvantifikační měřítka jsou uvedeny na obr. 1.2.

### **Kvalifikace**

Obrobitelnost lze kvalifikovat za dobrou při splnění jednoho či více z následujících kritérií:

- obrábění s minimálními energetickými požadavky,
- minimální opotřebení nástroje (jeho maximální životností),
- minimální řezné síly,
- eliminace problémů s utvářením a odvodem třísek,
- dobrá kvalita povrchu na obrobené ploše atd.

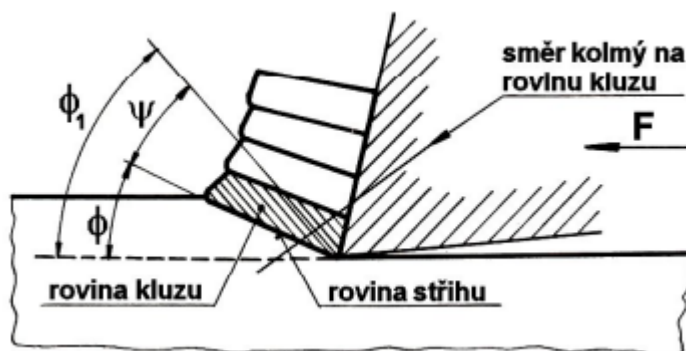
Jinými slovy lze říct, že dobrá obrobitelnost představuje co nejhospodárnější výrobu za daných technologických podmínek.



Obr. 1.2 Pro posouzení obrobitelnosti lze využít několik kvantitativních měřítek. [3]

Ačkoliv by nejvýstižnější obecnou definicí pro obrobitelnost mohl být objem odebraného materiálu na jednotku výkonu ( $\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kW}^{-1}$ ), tradiční postoj k obrobitelnosti je spojován s materiálem obrobku a vztahuje se pouze k opotřebení nástroje, životnosti nástroje a řezným rychlostem. Jelikož při obrábění kovů vznikají silné deformace v materiálu obrobku, dojde k překročení meze únavy, až se začne materiál oddělovat ve formě třísek. Je zřejmé, že řada vlastností obráběného materiálu má v tomto technologickém procesu velký vliv. [3]

Při vnikání řezného nástroje do materiálu obrobku je břit tlačěn do obrobku silou  $F$  a před a pod břitem se koncentruje napětí (obr. 1.3), které má za následek pružné a plastické deformace obráběného materiálu. Smykové napětí narůstá do té míry, až dojde k plastické deformaci materiálu před břitem nástroje (posuv jednotlivých vrstev materiálu v kluzných rovinách pod úhlem kluzu  $\Phi_1$ ).



Obr. 1.3 Vznik třísky [20]

Pohyb nástroje pokračuje, dále roste plastická deformace, dochází k posunu a pěchování vrstev materiálu před břitem nástroje, a to ve směru kolmém ke kluzným rovinám. Tím jsou vyčerpány veškeré možnosti plastické deformace materiálu v mikroobjemu. Při dalším pohybu nástroje dále roste napětí v materiálu, až dostoupí hodnoty vyšší než je stříhová mez pevnosti obráběného materiálu a dojde k odstřížení segmentu třísky v rovině stříhu pod úhlem stříhu  $\Phi$ . Rozdíl mezi úhly  $\Phi_1$  a  $\Phi$  se pohybuje v rozmezí  $\psi = (0-30)^\circ$ , nízké hodnoty úhlu  $\psi$  vykazují tvárné materiály (např. ocel), vysoké hodnoty vykazují křehké materiály (např. šedé litiny). [20]

### **Vlastnosti materiálu**

Vlastnosti obráběného materiálu, které významně ovlivňují řezný proces, můžeme rozdělit do sedmi základních skupin. Pro každou skupinu je uvedeno pár příkladů dokládajících vliv těchto vlastností na řezné procesy.

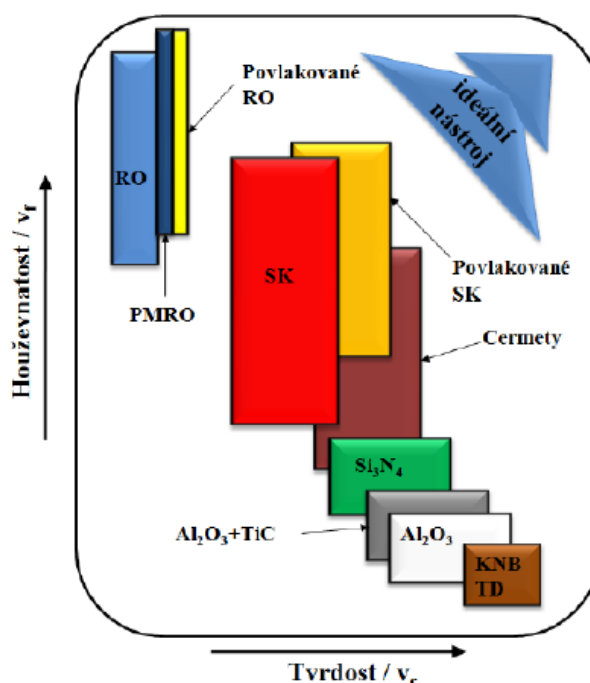
- Mechanické vlastnosti: Obrábění je proces deformace neboli přetváření materiálu obrobku. Tvrdost je definována jako odolnost proti deformaci a proto vysoká tvrdost materiálu obrobku znamená vysoké řezné síly.
- Chemické složení (obsah legujících prvků): Při obrábění je odebraný materiál odváděn po čele nástroje. Obrobek s vyšším obsahem manganu v materiálu tak způsobí větší opotřebení nástroje, protože mangan je velmi abrazivní materiál.
- Tepelné vlastnosti: Při správném obráběcím procesu je náležitě regulováno vytváření tepla a následné vysoké teploty v oblasti řezu. To v praxi znamená, že teplo musí být odváděno třískami. Pokud má ale obráběný materiál nízkou tepelnou vodivost, není to tak jednoduché.
- Vměstky: Vměstky vytvářejí „tvrdé části“, jejichž následkem je větší opotřebení nástroje a vyšší riziko vylomení řezné hrany.
- Sklon k mechanickému zpevnění: Při prvním řezu může dojít ke zpevnění v povrchové vrstvě obráběného materiálu. Další řez se s tím následně musí vypořádat, čímž vznikají větší řezné síly.
- Struktura materiálu: Některé materiály jsou snadněji obrobitelné než ostatní. Například při obrábění austenitických materiálů dochází k tvorbě třísek nepravidelných tvarů, což představuje obtížnější kontrolu utváření třísek.
- Původ materiálu: Jak důsledně jsou materiálové normy dodržovány dodavatelem materiálu. [3]

## 1.1 Těžkoobrobitelné materiály

Mezi těžkoobrobitelné materiály se řadí velké množství různých materiálů, které se od sebe liší hlavně chemickým složením a fyzikálně-mechanickými vlastnostmi, liší se i od běžných konstrukčních ocelí a tak i různou mírou ovlivňují obrobitelnost.

Těžkoobrobitelné materiály lze podrobněji rozdělit do těchto skupin:

- I. Vysokopevnostní materiály,
- II. Antikorozní oceli (martenziticko feritické, chromové),
- III. Antikorozní oceli chromniklové austenitické,
- IV. Žárupevné oceli chromové, chromniklové, chromniklové feritické a martenzitické,
- V. Žárupevné, žáruvzdorné oceli chromniklové, chromnikl-manganové austenitické,
- VI. Žárupevné a žáruvzdorné slitiny na bázi niklu a železa,
- VII. Žáruvzdorné slitiny na bázi niklu lité,
- VIII. Titan a jeho slitiny,
- IX. Keramické materiály. [2]



Obr. 1.4 ČSN ISO 513 (220801). Klasifikace a použití tvrdých řezných materiálů k obrábění kovů určeným ostrím. [4]



## ISO systém

- ISO-P materiály jsou materiály s tvorbou dlouhé třísky, které generují průměrné řezné síly, vytváření tepla (i řezné teploty) a průměrnou životnost nástroje.
- ISO-K materiály jsou materiály s krátkou třískou.
- ISO-M materiály (austenitické nerezové oceli) jsou odlišné od ISO-P především v tepelných vlastnostech (a jevech s tím spojených).
- ISO-N materiály jsou měkčí (nižší řezné síly), vykazují však vyšší přilnavost k řezným materiálům.
- ISO-S materiály vykazují výrazné rozdíly v tepelných vlastnostech oproti oceli.
- ISO-H materiály jsou velmi tvrdé a vyžadují vysoké řezné síly, pokud nejsou použity specifické metody obrábění (tzv. technologie tvrdého obrábění). [4]-[21]

 Ocel	 Korozivzdorná ocel	 Litina
 Hliník	 Žárovzdorné slitiny	 Tvrdá ocel

Obr. 1.5 Dělení materiálů podle systému ISO [5]- [21]

**ISO S** – Žárovzdorné superslitiny zahrnující celou řadu vysokolegovaných ocelí a materiály na bázi niklu, kobaltu, a titanu. Tyto materiály snadno ulpívají na břitě a tvoří nárůstek. Během obrábění dochází k jejich zpevňování (mechanické zpevňování) a vzniká velké množství tepla. Jejich vlastnosti jsou velmi podobné jako u oblasti ISO M, ale jejich obrábění je mnohem obtížnější a životnost břitě je kratší. [5]-[21]

Skupinu ISO S je možné rozdělit na žárovzdorné slitiny a titan.

Žárovzdorné slitiny lze dále rozdělit do tří skupin:

- slitiny na bázi niklu,
- slitiny na bázi železa,
- slitiny na bázi kobaltu. [4]

## 1.2 Obrobitelnost těžkoobrobitelných materiálů

Konstrukční materiály se špičkovými vlastnostmi potřebné pro rozvoj strojírenství, to jsou materiály s vysokými pevnostními parametry a s optimálními fyzikálně chemickými a jinými vlastnostmi představují velmi široký sortiment. Tento sortiment zahrnuje materiály, které jsou téměř neobrobitelné, i materiály, které sice vyžadují zvláštní technologický postup a podmínky obrábění (určité úpravy nástrojů a jejich geometrie, chlazení apod.), ale při správné technologii se obrábí jen málo hůře než běžné konstrukční oceli. Všeobecně se všechny tyto materiály označují jako těžkoobrobitelné. [6]

Volba hospodárných řezných podmínek při obrábění, tj. volba takové řezné rychlosti, hloubky řezu a posuvu nástroje, aby náklady na obrábění byly při vysoké produktivitě co nejmenší, je omezena řadou činitelů. Jsou to hlavně:

- a) konstrukce a výkon obráběcího stroje,
- b) vlastnosti nástroje (řezivost nástrojového materiálu, tvar nástroje, geometrie břitu),
- c) vlastnosti obrobku (tvar, tuhost obrobku a tuhost upnutí, požadovaná přesnost a jakost povrchu).

Materiálové vlastnosti mají obzvlášť významný vliv na volbu řezných podmínek. Pro tyto vlastnosti kovů a ostatních materiálů, určující vhodnost nebo způsobilost těchto materiálů k obrábění nástroji, které ovlivňují náklady na obrábění, byl přijat pojem obrobitelnost.

Obrobitelnost materiálů lze posuzovat obecně z mnoha hledisek. V praxi mají největší význam tato hlediska:

1. Vliv materiálu na intenzitu (rychlost) opotřebení břitu nástroje a na teplotu při obrábění. Tento vliv určuje velikost řezné rychlosti a zahrnuje se tedy do pojmu obrobitelnost podle řezné rychlosti.
2. Vliv materiálu obrobku na proces tvoření třísky, jednak z hlediska sil řezání, jednak z hlediska utváření oddělovaných třísek; označuje se jako obrobitelnost podle řezného odporu nebo podle utváření třísky.
3. Vliv materiálu obrobku na vytváření nových povrchů na obrobku a na jejich jakost; zahrnuje se do pojmu obrobitelnost podle drsnosti povrchu. [6]

## 2. Superslitiny

Superslitiny na bázi kobaltu mají nejvyšší pevnost při vysokých teplotách. Řadí se mezi velmi těžko obrobitelné materiály. Kobalt je dominantní prvek této skupiny slitin, tyto však obsahují význačné množství niklu, chrómu, wolframu. Ze superslitin jsou nejhůře obrobitelné, protože mají tendenci se vytvrzovat. V leteckých motorech se používají velmi málo, jen v částech s nejvyšší provozní teplotou.

Superslitiny na bázi niklu mají nikl jako hlavní prvek (obsah je 35 až 70 %) a významný podíl chrómu (až do 30 %). Jiné legující prvky se přidávají na zvýšení pevnosti, nebo korozní odolnosti. Kombinace niklu a chrómu poskytuje mimořádnou odolnost vůči oxidaci. Pevnost těchto slitin je větší než u korozivzdorných ocelí, hlavně nad 650 °C. Obrobitelnost superslitin niklu je o něco málo lepší než u kobaltových superslitin.

Superslitiny na bázi železa kromě dominantního prvku železa, obsahují význačné množství chrómu a niklu. Od korozivzdorných ocelí, které obsahují (12–25) % chrómu a (0–20) % niklu se liší tím, že mají kolem 20 % chrómu, ale více než 20 % niklu (často 25 až 35 %). Schopnost této skupiny superslitin, pokud jde o uchování si pevnosti při zvýšených teplotách, není řádově shodná s touto vlastností slitin na bázi niklu a kobaltu, a proto nemůže být použita v částech leteckého motoru s nejvyššími teplotami. [2]

### 2.1 Superslitiny niklu a jejich charakteristiky

Superslitiny niklu lze zařadit podle chemického složení jak mezi slitiny niklu, tak mezi superslitiny. Z hlediska obrábění se superslitiny niklu zařazují mezi těžkoobrobitelné materiály.

#### Slitiny niklu

Základem těchto slitin je nikl, který má vhodné fyzikálně-mechanické vlastnosti a hlavně dobrou odolnost vůči oxidaci až do 800 °C. Slitiny niklu jsou všeobecně pevnější, tvrdší a houževnatější než většina slitin neželezných kovů a řádu ocelí.

Konstrukční slitiny niklu lze rozdělit do třech skupin:

1. Slitiny pro práci v běžných podmínkách
2. Antikorozní slitiny
3. Žáruvzdorné slitiny

Konstrukční slitiny niklu pro práci v běžných podmínkách se používají ve státech, kde nikl není nedostatkovým kovem, u nás jen v malé míře. Jsou to slitiny s přísadou Mn, Si a Mo, ale také Cu, Fe, Cr, Co, Al, Be.

Slitiny Ni-Cu jsou nejrozšířenějším představitelem této skupiny – mají až 32 % Cu s přísadami Si, Mn, Fe, Al a jsou známe pod obchodním značením Monely. Vyrábějí se z nich ventily, čerpadla, námořní komponenty, tepelná zařízení apod.

Antikorozní slitiny niklu jsou vhodné pro nejtěžší korozní podmínky, pro které jiné materiály nevyhovují korozní odolností (oceli), mechanickými vlastnostmi (olovo, nekovové materiály) nebo extrémně vysokou cenou (tantal, titan).

Pro redukčně působící prostředí byly vyvinuté slitiny Ni-Mo-Fe jako Hastelloy A a Hastelloy B; využívají se např. pro nádrže na moření v HCL nebo v H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pro oxidační prostředí se využívají slitiny Ni-Mo-Cr (Hastelloy C) a Ni-Si-Cu (Hastelloy D), které odolávají kyselině sírové v celém rozsahu teplot až po bod varu.

Žáruvzdorné a žárupevné slitiny niklu jsou vysokopevnostní konstrukční materiály používané tam, kde nepostačují svými vlastnostmi špičkové žárupevné oceli, používají se pro přechodné teploty na 750 °C. Jejich vývoj byl motivovaný hlavně vývojem spalovacích turbín, potřebou pracovat s vyššími teplotami spalín, hlavně u nejexponovanějších součástí jako jsou oběžné lopatky. Žárupevné Ni slitiny jsou převážně slitiny Ni s Cr, Ti, Al, Mo, W, Co, Ta, Nb, C a dalšími prvky, jejich představitelem je anglická slitina Nimonic, která se stala východiskem pro vývoj i v dalších oblastech. Komplexně legované vytvrditelné slitiny niklu se pro své vlastnosti označují jako superslitiny. [2]

## 2.2 Vliv jednotlivých prvků na strukturu a vlastnosti Ni slitin

Prvky v niklových slitinách můžeme rozdělit do dvou skupin:

1. prvky, které působí na zpevnění matrice (Al, Ni, Nb, Mo, W, V, Fe a Co)
2. prvky, které působí na zpevnění hranice zrn (B, Zr, C, Cr, W, Mo, V)

V žárupevných slitinách se nachází i jiné prvky, např. Pb, Bi, Se, S, které ale oslabují hranice a tím snižují pevnost slitiny.

**Kobalt, železo** – s Ni tvoří substituční tuhý roztok, základní kovovou hmotu (matrici). Tato matrice se značí  $\gamma$  a má plošně centrovanou kubickou mřížku. Místo niklu se přidává Fe a Co, při vzrůstu obsahu Fe ale klesá odolnost materiálu vůči vysokoteplotní korozi a roste

náchylnost na tvorbu nežádoucí  $\sigma$  fáze, což snižuje rozpustnost Al, Ti v matrici a způsobuje zvýšení pevnosti při vysokých teplotách. Průměrné obsahy v niklových slitinách Fe (0–35) %, Co (0–15) %.

**Chrom** - má dvojitý účinek v žárupevných slitinách:

- I. Zvyšuje odolnost vůči vysokoteplotní korozi, nachází se v matrici.
- II. Účastní se při tvorbě komplexních karbidů, které zpevňují matrici hlavně v oblasti hranic zrn.

Příznivý korozivzdorný účinek chromu spočívá ve vytrvání adhezních kysličníků na povrchu materiálu pracujícího v oxidačním prostředí, přičemž minimální obsah Cr, který zaručuje korozní odolnost je 13 % hm. Optimální obsah Cr v Ni slitinách by se měl pohybovat v rozmezí 15 až 30 hmot. %.

**Hliník, titan, niob** – Ti, Al tvoří s niklem intermetalické precipitáty  $Ni_3(Al, Ti)$  označené  $\gamma'$ . Teplota její rozpustnosti závisí od chemického složení Ti, Al se může ve fázi  $\gamma'$  nahradit Nb, přičemž když obsah Nb je vyšší než 4%, dochází k vytvoření samostatné zpevňující fáze  $Ni_3Nb$  s tetragonální mřížkou. Alk zlepšuje korozní odolnost tím, že vytváří ochrannou vrstvu  $Al_2O_3$ . Ti a Nb můžou vytvářet také karbidy.

Průměrné obsahy v Ni slitinách: Ti (0–5) %, Al (0–7) %, Nb (0–6) %

**Molybden, wolfram, tantal** – Tyto prvky způsobují substitučně vytvrditelné matrice  $\gamma$ . V určitém rozsahu se rozpouštějí ve fázi  $\gamma'$  a tak mění parametry pevnostních charakteristik např. teplotu tavení, parametry mřížky, zvyšují napětí na rozhraní  $\gamma'$  a matrice.

Spolu s uhlíkem vytvářejí různé typy karbidů, které vedou ke zpevnění ve vysokých teplotách. Zvýšení obsahu W a Ta způsobuje zvýšení měrné hmotnosti slitiny, což je nežádoucí pro součástky namáhané odstředivou silou ve vysokých teplotách.

**Bór, zirkon** – jsou přidávány pro zlepšení creepové pevnosti a tažnosti. Přítomnost Zr a B ovlivňuje kinetiku rozpadu tuhého roztoku. Zr se zúčastní přímé tvorby vytvrzující fáze, B zpomaluje difuzi legujících prvků a tedy i rozpad tuhého roztoku.

Zr a B nepříznivě působí na svařitelnost materiálu. Průměrné obsahy daných prvků v Ni slitinách: B (0,005–0,06) %, Zr (0–0,1) %. [2]

## 2.3 Inconel

Inconel je jednou z nejpobulárnějších superslitin niklu. Jeho vysoký obsah chrómu a dalších legujících prvků zajišťuje vysoce odolný materiál proti korozi a oxidaci. Hodí se zejména pro využití v horkém a agresivním prostředí. Vynikající mechanické a chemické vlastnosti si tato slitina zachovává i při vysokých teplotách. Inconel při zahřátí vytváří stabilní a přilnavou oxidickou vrstvu, která chrání povrch před dalším napadením. Inconel je velmi dobře tepelně zpracovatelný a vytváří širokou škálu mechanických vlastností, včetně tvrdosti a pevnosti, které může získat. [7]

Tab. 2.1 Vlastnosti superslitiny Alloy 625 [16]

Mechanické vlastnosti		Fyzikální vlastnosti	
Mez kluzu $R_p 0,2$	415 MPa	Hustota $\rho$	$8,4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$
Tvrdost HB	200	Měrné teplo $c_p$	$410 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Mez pevnosti $R_m$	862 MPa	Těpl. souč. roztažnosti $\alpha$	$11,1\cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Tažnost A	50%	Tepelná vodivost $\lambda$	$10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

Tab. 2.2 Chemické vlastnosti superslitiny Alloy 625 [19]

Ch. prvek	Ni	Cr	Fe	Mo	Nb	Si	P
hm. %	min. 58	20 - 23	max. 5	8.10	3.4	max. 0,5	1,5
Ch. prvek	Ti	Si	Al	C	Co	Mn	
hm. %	max. 0,4	max. 0,5	max. 0,4	max. 0,1	max. 1	max. 0,5	

### Aplikace Inconelu

S Inconelem se často setkáváme v extrémních prostředích. Nejčastěji se jedná o použití niklové slitiny, kde obvykle tvoří 50 % hmotnosti tryskových motorů v leteckém a kosmickém průmyslu. Mezi další použití patří turbodmychadla rotorů a jejich těsnění, ponorné čerpadla, motorové hřídele, tlakové nádoby pro chemické zpracování, trubky tepelných výměníků a parních generátorů v tlakovodních reaktorech. [7]

### Obecné obráběcí vlastnosti Inconelu

Inconel je náročný materiál pro obrábění díky své vysoké pevnosti, abrazivitě, nízké tepelné vodivosti a hlavně díky tendenci vytvrzování se. Ke zpevnění povrchu dochází

vždy, když nástroj umožňuje řez. Povrch po opracování je v řezu mírně deformovaný, přičemž je podstatně tvrdší, než původní materiál.

Další komplikace, která souvisí s houževnatostí této slitiny, je špatná lámavost třísky. Proto je důležitá správná volba nástroje, která tyto faktory ovlivňuje (geometrie nástroje, řezné síly a dráha nástroje). Dále je nezbytné použití vhodné procesní kapaliny, vzhledem k nízké tepelné vodivosti této slitiny. [7]

## **2.4 Řezné nástroje**

Přítomnost tvrdých karbidů v superslitinách tyto materiály dělá abrazivními ve všech důsledcích na opotřebení nástroje. Mezi základní faktory, podmiňující špatnou obrobitelnost superslitin niklu se dále považují:

- malá tepelná vodivost,
- vysoká schopnost k deformačnímu zpevnění (samovytržování),
- vysoký sklon k adhezi,
- žárupevnost. [2]

### **Materiály řezných nástrojů**

Při obrábění superslitin mohou být použity nástroje z rychlořezné oceli, ze slinutých karbidů bez povlaku a z nekovových materiálů hlavně řezné keramiky, kubického nitridu boru nebo diamantu. [2]

#### **2.4.1 Rychlořezné oceli**

Z rychlořezných ocelí jsou vhodné jen rychlořezné oceli výkonné a vysokovýkonné a to hlavně tam, kde druh nástroje a druh operace nedovolují uplatnit nástroje z SK, např. při přerušovaných řezech. Měřidlem výkonu rychlořezné oceli je jejich odolnost vůči popouštění a tvrdosti za tepla, odolnost vůči abrazivnímu opotřebení a houževnatost. [2]

#### **2.4.2 Slinuté karbidy**

Pro volbu optimálního druhu SK materiálu je rozhodující charakter namáhání řezného klínu nástroje. Řezný klín nástroje je při obrábění namáhán jak mechanicky, tj. ohyb, rázy, tak třením. Opotřebení řezného klínu otěrem je možné rozdělit na:

- Mechanický otěr, který vzniká v oblasti nízkých teplot obrábění jako abrazivní a adhezní a způsobuje opotřebení hřbetu nástroje.

- Fyzikálně-chemický otěr, který vzniká při obrábění velkými řeznými rychlostmi a za vysokých teplot obrábění. Difúzní otěr způsobuje výmoly na čele nástroje.

Povlakované SK destičky při obrábění superslitin se neuplatňují, protože povlak rychle zmizí, tím pádem nemá žádný pozitivní účinek na řezný proces a ani ekonomii obrábění. Řezné materiály SK jsou však nejvýznamnější skupinou pro obrábění širokého sortimentu superslitin. [2]

### **2.4.3 Řezná keramika a kubický nitrid boru**

Stále více se pro obrábění superslitin – hlavně s abrazivním působením – používají keramické řezné destičky. Je to způsobeno rychlým vývojem keramických materiálů s vyšší houževnatostí a bezpečnosti řezných destiček, které umožňují obrábění s vyšším rozsahem řezných rychlostí, v některých případech 10 až 15 krát více než u slinutých karbidů. [2]

Řezná keramika a CBN jsou řeznými materiály, které umožňují vysokorychlostní obrábění a obrábění velmi tvrdých materiálů.

Vysokorychlostní obrábění, obrábění za sucha a obrábění velmi tvrdých materiálů představují výzvu současnému obráběcímu průmyslu. K její realizaci musí být splněny odpovídající předpoklady, zahrnující jak obráběcí stroje odpovídajících parametrů, tak i nástroje a samotné metody třískového obrábění. V tomto řetězci hrají důležitou roli řezné materiály, jejichž fyzikální vlastnosti a z nich plynoucí výkonové charakteristiky jsou předpokladem k uskutečnění vysokovýkonných obráběcích operací.

## **2.5 Obrábění velmi tvrdých materiálů**

Obrábění velmi tvrdých materiálů vyžaduje vysokou tvrdost, otěruvzdornost a odolnost vůči vysokým teplotám (kontakt se žhavými třískami), stejně tak jako dobrou vrubovou houževnatost a vysokou odolnost řezné hrany proti lomu a vydrolování. Tyto požadavky splňuje směsná keramika a CBN. Typickou oblastí jejich použití je například obrábění ozubených kol pro převodovky, hnacích kuželových kol se šikmými zuby, talířových ozubených kol, válečkových ložisek, kuličkových tažných šroubů a válcové frézování. Tvrdé slitiny jsou upřednostňovány při výrobě šnekových extrudérů (strojů k výrobě forem z termoplastických materiálů) nebo ventilů větších rozměrů.



### **2.5.1 Směsná keramika se submikronovou strukturou**

Nové druhy směsné keramiky SH2 se vyznačují neobyčejnou homogenitou a jemnou strukturou v oblasti submikronových částic. Společná kombinace a způsob konečného zpracování byly optimalizovány za účelem získání požadovaných vlastností. Průměrná velikost zrna se pohybuje výrazně pod hranicí 1  $\mu\text{m}$ .

Při dokončovacích operacích se použitím submikronové směsné keramiky zvyšuje bezpečnost operace i životnost nástroje. Při obrábění v nepřerušovaném řezu a při rovnoměrném přídavku na obrábění se již použití tohoto typu směsné keramiky vžilo. Další nespornou výhodou, kterou směsná keramika nabízí, je dobrý poměr ceny a výkonových parametrů tohoto materiálu. Také je standardně k dispozici široká paleta utvářečů třísky a geometrií vyměnitelných břitových destiček. [8]

### **2.5.2 Deformační zpevnění**

Odřezání vrstvy materiálu ve tvaru třísky se uskutečňuje po jeho předcházející plastické deformaci v oblasti řezání a tření na čelní a hřbetní ploše. Projevem těchto plastických deformací je zpevnění deformovaného materiálu, jeho povrchové vrstvy.

Deformační zpevnění se vysvětluje jako zvýšený odpor krystalické stavby kovové hmoty proti pohybu dislokací jako nositeli plastické deformace. Žárupevné niklové slitiny mají kubickou plošně centrovanou mřížku a tedy i velký počet skluzových rovin s možností skluzných posunutí a proto jsou poměrně lehce plasticky deformovatelné.

Deformační zpevnění se projevuje:

- zvýšeným měrným odporem  $k_c$  (MPa),
- zvýšenou vynaloženou prací, resp. výkonem na odřezávání už zpevněného materiálu,
- intenzivním vývojem tepla a k tomu zodpovídající teploty v oblasti plastických deformací významně ovlivňující stupeň zpevňování materiálu se zřetelem na jeho žárupevnost,
- zpevněný materiál, obtékající řezný klín, tepelně vysoce zatížený, jej opotřebovává zvýšenou intenzitou.

Všeobecné zásady pro snížení, resp. vyhnutí se samovytvrzování materiálu hlavně při dokončovacím obrábění, které je zvláště důležité při výrobě ze superslitin jsou:

- I. Použití řezných nástrojů s pozitivní geometrií – kladnými úhly čela, které řezou materiál místo toho, aby jej tlačili.
- II. Vyhnout se příliš malým hodnotám posuvů a malým hloubkám řezu.
- III. Nepřipustit příliš velké opotřebení řezného klínu nástroje, aby se řezný klín netřel o obrobek. [2]

### 3. Řezné síly

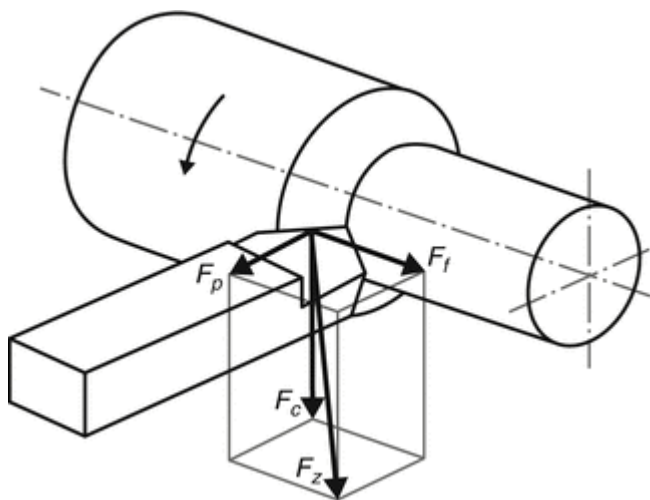
Řezné síly se při obrábění kovů zkoumají nejen z praktického hlediska, ale také z teoretického významu. Teorie řezných sil umožňuje zpřesnění o řezných procesech. Řezné síly a jejich poznatky jsou v praxi důležité při konstrukci nástrojů, volbě řezných poměrů, při konstruování obráběcích strojů a při výpočtech. Dnešní zkoumání sil v teoretické části obrábění se opírá zejména o měření, které se uskutečňuje různými dynamometry. Známé jsou i teoretické práce, které vycházejí z fyzikálních konstant obráběných materiálů a z geometrie řezného nástroje, z nichž jsou také odvozené vzorce pro výpočet řezné síly. [9]-[10]

Řezná síla je dynamický jev, což má za následek, že v časové linii není konstantní. Řezná síla na začátku řezání roste až po určité maximum, které je charakteristické pro moment oddělení elementu třísky od základního materiálu. Následně síla poklesne, ale ne na nulovou hodnotu, protože před skončením posunutí elementu začne deformace dalšího elementu.

Řeznou sílu můžeme vnímat ve smyslu:

a) **statickém**, přičemž jde o určitou střední hodnotu mezi nejmenší a největší hodnotou kolísání řezné síly,

b) **dynamickém**, přičemž jde o skutečný obraz velikosti řezné síly, zachycený v neustálé změně, která je pro řeznou sílu charakteristická během celého řezného procesu.



Obr. 3.1 Síly působící na nástroj [15]

Je potřeba rozlišovat celkovou řeznou sílu a řezný odpor. Řezná síla  $F$  je síla celková, touto silou působí nástroj na obrobek. Řezný odpor  $R$  ( $F'$ ) je opačně působící síla obrobku na nástroj. Celková řezná síla  $F$  má všeobecný a neznámý směr, proto ji rozkládáme do složek v různých směrech. Na základě složek sil je možné určit velikost a směr výsledného silového působení. Jedná se tedy o celkově řeznou sílu a složky řezné síly. Dynamometry různé konstrukce, založené na různých principech umožňují určit velikost složek řezné síly  $F_c$ ,  $F_p$  a  $F_f$ . Na jejich základě je možné určit nejen velikost výsledné síly  $F$ , ale i směr. Matematické vyjádření výsledné síly  $F$  je dáno vztahem 3.1. [9]-[10]

**Vztah mezi celkovou silou a jejími složkami:**

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} \quad [\text{N}], \quad (3.1)$$

kde:

$F_f$  – posuvová složka řezné síly působící ve směru osy obrobku. Je kolmá na směr tangenciální i radiální složky. Využívá se na dimenzování posuvových mechanismů.

$F_p$  – pasivní složka řezné síly působící radiálně ve směru kolmém k obráběné ploše. Je základní funkcí přísuvu anebo specifického tlaku přitlačovaným nástrojem k obrobku. Tato složka výrazně působí na rozměrovou přesnost obráběných ploch, odchylky geometrického tvaru, polohy a drsnost povrchu. Slouží na určení tuhosti obráběcího stroje a všeobecně na analýzu dynamického chování.

$F_c$  – řezná složka řezné síly působící ve směru hlavního řezného pohybu, nazývaná hlavní složka řezné síly. U rotačních pohybů určuje velikost kroutícího momentu, který působí na obrobek anebo na nástroj. Udává potřebný výkon elektromotoru a celkové množství tepla, které se vytváří v místě řezání.

Složky řezných sil převážně závisí na řezných parametrech ( $v_c$ ,  $a_p$ ,  $f$ ), na nástrojové geometrii, řezném prostředí, obráběném materiálu, atd. Při zvyšování řezné rychlosti  $v_c$  se složky řezné síly zmenšují. Zvětšením úhlu nastavení  $\kappa_r$  se posuvová síla  $F_f$  zmenšuje. Řezná síla  $F_c$  se zmenšuje, pouze po úhel nastavení  $\kappa_r$  45°.

Empirické vztahy vyjadřující celkové řezné síly nebo jejich složky:

$$F_c = C_{Fc} \cdot v_c^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} \cdot a_p^{z_{Fc}} \quad [\text{N}], \quad (3.2)$$

$$F_p = C_{Fp} \cdot v_c^{x_{Fp}} \cdot f^{y_{Fp}} \cdot a_p^{z_{Fp}} \quad [\text{N}], \quad (3.3)$$

$$F_f = C_{Ff} \cdot v_c^{x_{Ff}} \cdot f^{y_{Ff}} \cdot a_p^{z_{Ff}} \quad [\text{N}], \quad (3.4)$$

Kde:

$C_{Fc}$  – konstanta z empirického výpočet pro výpočet ř. síly při soustružení,

$x_{fc}$  – exponent z empirického vztahu pro výpočet řezné síly,

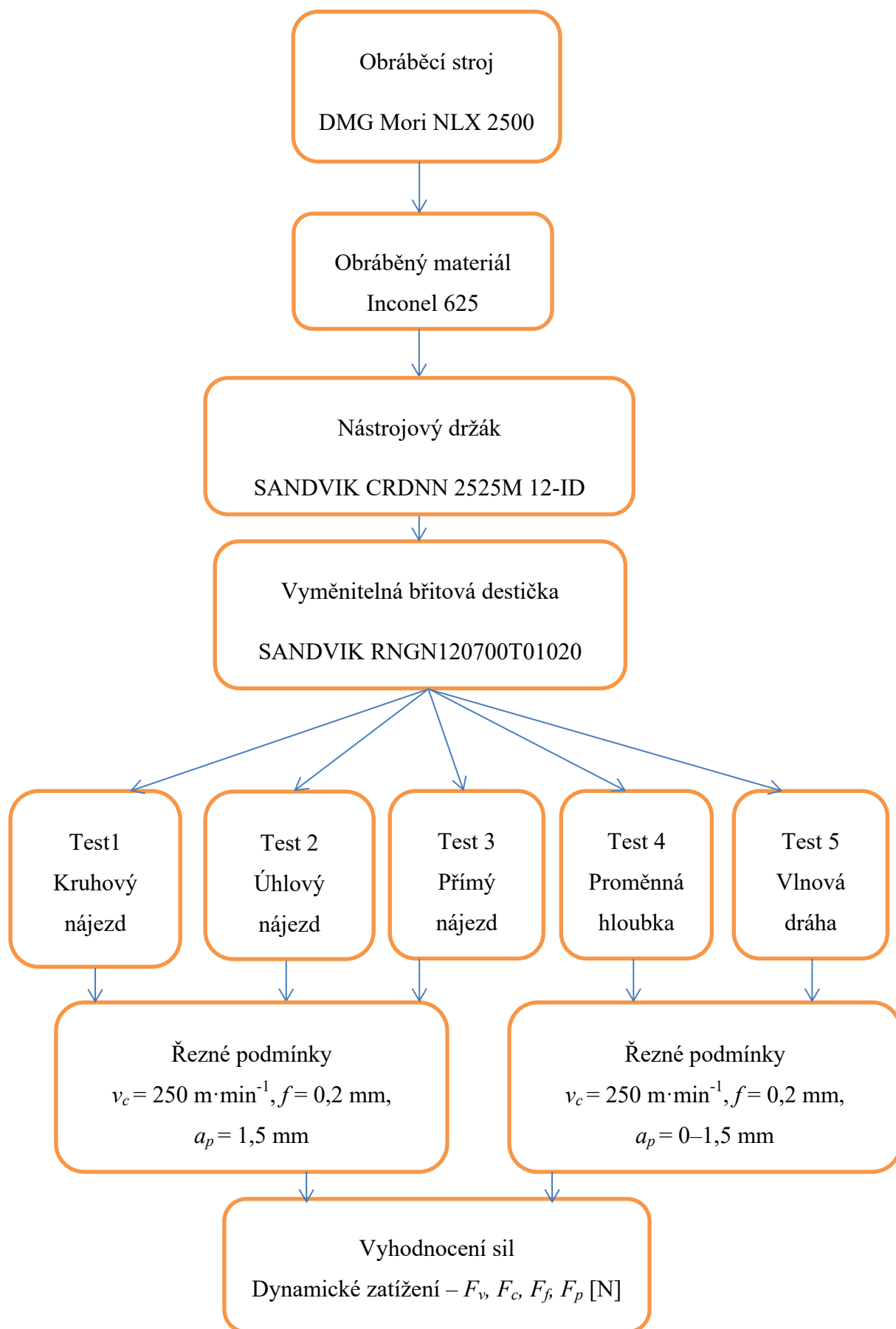
$y_{Fc}$  – exponent z empirického vztahu pro výpočet řezné síly,

$z_{Fc}$  – empirická konstanta. [9]-[10]

## 4. Experimentální část

V praktické části byla použita na obrábění, přesněji podélné soustružení žáruvzdorná niklová slitina Inconel 625 podle ASM 5666F (W.Nr. 2.4856), tato slitina díky přidaných prvků jako je Ni a Mo se vyznačuje velmi výbornými mechanickými, tak i fyzikálními vlastnostmi za nízkých i vysokých teplot. Zvoleno bylo soustružnické centrum DMG MORI NLX 2500 MC/700 se softwarem Mitsubishi M730BM. Během procesu obrábění byly zkoumány síly řezných složek při soustružení navrženými strategiemi. K měření sil sloužil dynamometr zn. KISTLER 9129AA ve kterém byl uchycen nožový držák s keramickou destičkou. Vzhledem k velikým opotřebením VBD při obrábění superslitin, se zkoumaly příčiny, resp. síly působící na nástroj a to ve třech osách X, Y a Z. Polotovár byl uchycen v čelistech stroje a podepřen koníkem, aby se snížilo chvění obrobku a stroje, jelikož dynamometr má velmi vysokou citlivost. Řezné parametry jako řezná rychlost a posuv, byly nastaveny pro všechna měření odlišných strategií na stejnou hodnotu, aby byly srovnatelné výsledky naměřených hodnot. Hloubka řezu se měnila dle dané strategie. Po každém vykonaném řezu (strategii), byla VBD vyjmuta z nožového držáku a vložena pod mikroskop. Vizuálně zobrazené opotřebení VBD bylo fotograficky zachyceno pro každou strategii. Z naměřených hodnot počítač vygeneroval grafické zobrazení, kde jsou vyneseny síly v daném čase obrábění.

## Schéma experimentálního měření



## 4.1 Volba obráběcího stroje

Vzhledem k vysoké tvrdosti těžkoobrobitelných materiálů, tedy materiálu Alloy 625, je zapotřebí použít stroje s vysokou pevností a tuhostí konstrukce. V experimentální části bylo pro podélné soustružení použito CNC obráběcí centrum DMG MORI NLX2500MC/700\_M730BM v laboratoři obrábění Katedry obrábění, montáže a strojírenské metrologie. Jedná se o CNC soustruh s vysokou tuhostí a stabilitou celého stroje. Tento soustruh obsahuje řídicí systém Mitsubishi M730BM, nástrojovou hlavu s 12ti nástroji z toho 4 rotačně poháněné nástroje. Technické parametry stroje jsou uvedeny v tab. 4.1.



*Obr. 4.1 CNC soustružnické centrum NLX2500MC/700\_M730BM [16]*

Tab. 4.1 Technické parametry stroje NLX2500MC/700

Pracovní rozsah	Oběžný průměr nad ložem	787 mm
	Největší soustružená délka	705 mm
	Největší průměr obrobku	366 mm
	Rozsah délky osy Z	260 mm
	Rozsah délky osy X	795 mm
Vřeteno	Rozsah otáček	4000 min <sup>-1</sup>
	Výkon vřetene	18,5 kW
Nástroje	Počet nástrojů	12
	Počet poháněných nástrojů	3
	Výkon poháněných nástrojů	5,5 kW
Posuvné pohony	Rychloposuv	30 000 mm/min
	NC Koník	

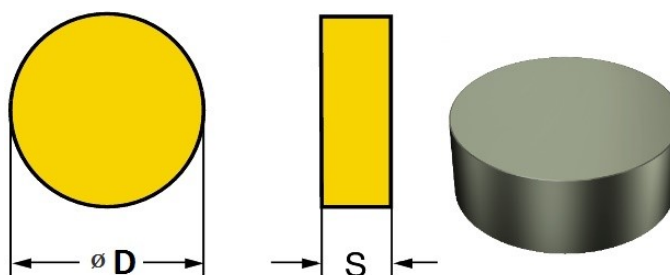


## 4.2 Volba řezného nástroje

Jako Sialon (SiAlON) jsou označovány třídy, které se vyznačují kombinací pevnosti samovyztužitelné sítě z nitridu křemíku a vysoké chemické stability. Sialonové třídy jsou ideální pro obrábění žárovzdorných slitin (HRSA). CC6060, CC6065 keramika vyztužená whiskery, jmenovitě whiskery karbidu křemíku (SiCw), se vyznačuje strmým nárůstem houževnatosti a umožňuje použití řezné kapaliny. Řezná keramika vyztužená whiskery je ideální pro obrábění slitin niklu. CC670

Třída CC670 - Keramika vyztužená whiskery, s mimořádnou houževnatostí, určená pro soustružení, zapichování a frézování slitin na bázi Ni. Její použití je také možné pro soustružení tvrzených součástí za nepříznivých podmínek. [12]

Zvolená keramická destička třídy **CC670** firmy **SANDVIK**, doporučené řezné podmínky dle výrobce:  $a_p = 1,8 \text{ mm}$ ,  $f_n = 0,4 \text{ mm/r}$ ,  $v_c = 295 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ .



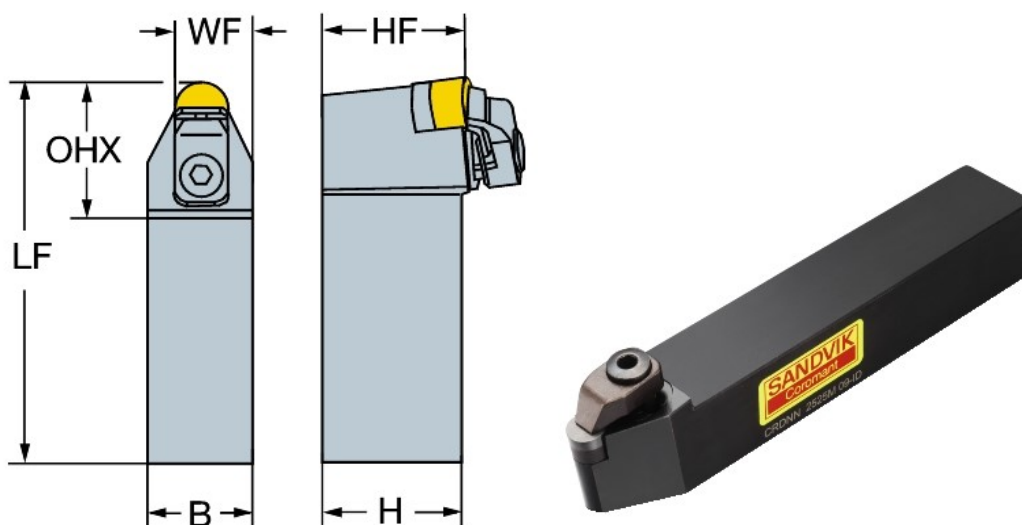
Obr. 4.2 Břitová keramická destička SANDVIK RNGN120700T01020 670 [20]

Tab. 4.2 Parametry keramické řezné destičky [20]

<b>RNGN120700T01020 670</b>	
průměr vepsané kružnice, D	12,7 mm
poloměr rohu, RE	6,35 mm
šířka čela hřbetu	0,1 mm
úhel čela hřbetu	20°
tloušťka destičky, S	7,9375 mm

### 4.3 Volba nožového držáku

Pro upnutí keramické destičky o průměru 12,7 mm, byl zvolen nožový držák s horní upínkou zn. SANDVIK znázorněný na obr. 4.3.



Obr. 4.3 Nožový držák SANDVIK CRDNN 2525M 12-ID [18]

Tab. 4.3 Parametry držáku SANDVIK CRDNN 2525M 12-ID [18]

CRDNN 2525M 12-ID	
funkční délka, LF	150 mm
maximální přesah, OHX	32 mm
funkční šířka, WF	18,8 mm
šířka stopky, B	25 mm
výška stopky, H	25 mm
funkční výška, HF	25 mm

### 4.4 Měřicí zařízení

Pro měření sil při soustružení, které působí na nástroj během procesu řezání, byl použit piezoelektrický třísložkový dynamometr **KISTLER 9129AA** viz obr. 4.4, kterým je také vybavena Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie. Dynamometr při zatížení zaznamenává působící síly, které posílá přes zesilovač do počítačové jednotky.

Měřicí aparatura je složena z těchto částí:

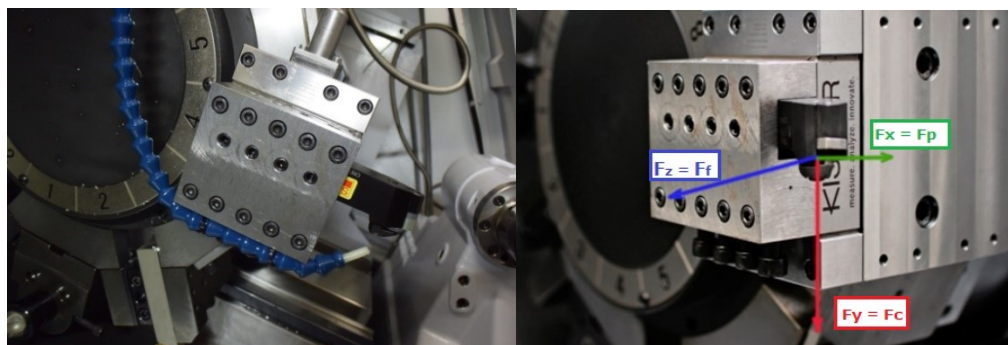
- Třísložkový univerzální stacionární dynamometr KISTLER 9129AA.
- Nábojový zesilovač/převodník.
- DAQ box (systém sběru dat – digitálně analogový převodník), umožňuje zapojení dvou dynamometrů.
- Software ke zpracování dat – DynoWare.
- Počítačová sestava. [11]



Obr. 4.4 třísložkový stacionární dynamometr 9129AA a zesilovač 5070A [17]-[16]

Tab. 4.4 Parametry dynamometru KISTLER 9129AA [17]-[16]

Funkce	parametry
Měřicí rozsah $F_x, F_y, F_z$	-10–10 kN
Citlivost $F_y, F_z$	$\approx -8 \text{ pC} \cdot \text{N}^{-1}$
Citlivost $F_y$	$\approx -4,1 \text{ pC} \cdot \text{N}^{-1}$
Vlastní frekvence $f_{n_x}$	$\approx 3,5 \text{ kHz}$
Vlastní frekvence $f_{n_y}$	$\approx 4,5 \text{ kHz}$
Vlastní frekvence $f_{n_z}$	$\approx 3,5 \text{ kHz}$
Teplotní pracovní rozsah	0–70 °C
Hmotnost	3,2 kg
Rozměry (d × š × v)	90 × 105 × 32 mm



Obr. 4.5 Ustavení a upnutí dynamometru 9129AA do revolverové hlavy [11]

Na obr. 4.5 jsou zobrazeny síly působící na nástroj, kde:

- $F_x$  složka síly řezání působící kolmo k ose obrobku – vyjadřující pasivní (radiální) složku síly řezání  $F_p$ ,
- $F_y$  složka síly řezání působící tangenciálně – vyjadřující řeznou složku síly řezání  $F_c$ ,
- $F_z$  složka síly řezání působící ve směru posuvu – vyjadřující posuvovou složku síly řezání  $F_f$  [11]

#### 4.5 Volba řezných podmínek

Řeznou rychlost je třeba náležitě přizpůsobit, aby v oblasti řezu vznikalo dostatečné množství tepla potřebné ke zvýšení plasticity třísek, ale ne příliš mnoho, aby nedocházelo ke ztrátě stability keramiky. Posuv musí být zvolen tak, aby vznikala tříska dostatečné tloušťky, která má být taková, aby nedocházelo k mechanickému zpevnění materiálu, ale ne příliš velká, aby nedocházelo k vylamování částí ostří. Větší posuvy a hloubky řezu vyžadují snížení řezných rychlostí. Tyto hranice se mění v závislosti na tvrdosti materiálu obrobku a velikosti zrna. [12]

Pro stanovení obrábění je důležité určení řezných podmínek. Zvoleny jednotlivé parametry  $v_c$  – řezná rychlost,  $a_p$  – hloubka řezu a  $f$  – posuv. Velikost jednotlivých podmínek charakterizuje množství odebraného materiálu za jednotku času, což je ovlivňující v produktivitě obrábění a celkové výroby.

Vzhledem k obráběným materiálům a jejich mechanickým vlastnostem, je často nutné řezné podmínky upravovat. Jelikož se jedná o superslitinu Alloy 625, která je těžkoobrobitelná, byly řezné podmínky mírně upraveny. Dle výrobce SANDVIK, který uvádí dle normy ISO – S na keramických destičkách RGN120700T01020 670 dané

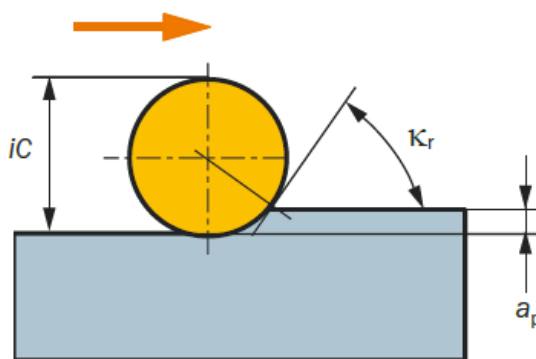
hodnoty, byly posunuty do přípustných mezí. Při obrábění slitin na bázi niklu, se kladě důraz především na řeznou rychlost, která ovlivňuje opotřebení nástroje. Proto je důležitá správná volba řezných podmínek a nástrojového materiálu.

#### 4.5.1 Řezné parametry

Při volbě hodnoty posuvu a řezné rychlosti v obrábění superslitiny Alloy 625 byly zohledněny doporučené parametry výrobce. U destiček RNGN120700T01020 670 jsou dané parametry posuvu  $f_{ot}$  na otáčku 0,4 mm (0,19–3,38). Ke špatné obrobiteľnosti materiálu byla zvolena hodnota posuvu na otáčku  $f_{ot} = 0,2$  mm. Řeznou rychlost výrobce uvádí na hodnotu  $v_c = 295 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ . Ta byla snížena na  $v_c = 250 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ . Hloubka řezu  $a_p$  výrobce uvádí 1,8 mm (0,10–3,60). Aby bylo zohledněné nastavení úhlu hlavního ostří  $\kappa_r \leq 45^\circ$ , byla hloubka řezu stanovena na  $a_p = 1,5$  mm. Dle výpočtu matematického vyjádření (4.1) se úhel hlavního ostří rovná  $40,2^\circ$ .

#### 4.5.2 Nastavení úhlu hlavního ostří $\kappa_r$ :

Při obrábění je nejlepšího výkonu dosaženo, pokud vstupní úhel je menší než  $45^\circ$ . Ten se udává zadáním hloubky řezu  $0,15 \times$  průměr řezné destičky (maximální hloubka řezu by neměla být větší než  $0,25 \times$  průměr destičky). Při řezných hloubkách větších než 25 %, je lepší použít destičky čtvercových tvarů.



Obr. 4.6 Schéma výpočtu úhlu nastavení hlavního ostří  $\kappa_r$  [13]

#### Výpočet úhlu $\kappa_r$ :

$$\cos \kappa_r = \frac{0,5 \cdot iC - a_p}{0,5 \cdot iC} \quad (4.1)$$

$$\cos \kappa_r = \frac{0,5 \cdot 12,7 - 1,5}{0,5 \cdot 12,7} = 40,2^\circ$$

kde je:

$\kappa_r$  – úhel nastavení hlavního ostří [°],

$iC$  – průměr břitové destičky [mm],

$a_p$  – hloubka řezu [mm]. [13]

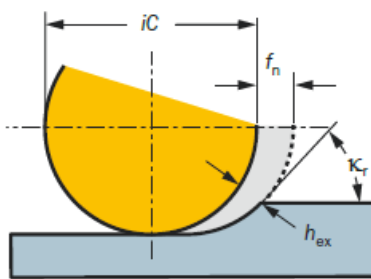
#### **Tloušťka třísky:**

Tloušťka třísky se mění s průměrem destičky a závisí na zadaném úhlu. Při nízkém poměru  $a_p/iC$  může být přísun zvýšen, aby se zvýšila tloušťka třísky na požadovanou úroveň.

Doporučená tloušťka třísky  $h_{ex}$  pro HRSA dle výrobce:

Slinutý karbid: 0,1 až 0,35 mm

Řezná keramika: 0,08 až 0,15 mm [13]



Obr. 4.7 Schéma výpočtu tloušťky třísky  $h_{ex}$  [13]

#### **Výpočet tloušťky třísky $h_{ex}$ :**

$$f_n = \frac{h_{ex}}{\sin \kappa_r} \quad (4.2)$$

$$h_{ex} = f_n \cdot \sin 40,2^\circ$$

$$h_{ex} = 0,2 \cdot \sin 40,2^\circ = 0,13 \text{ mm}$$

Kde je:

$f_n$  – posuv na otáčku [mm],

$h_{ex}$  – tloušťka třísky [mm],

$\kappa_r$  – úhel nastavení hlavního ostří [°]. [13]

Tab. 4.5 Výrobce SANDVIK doporučená tloušťka třísky [13]

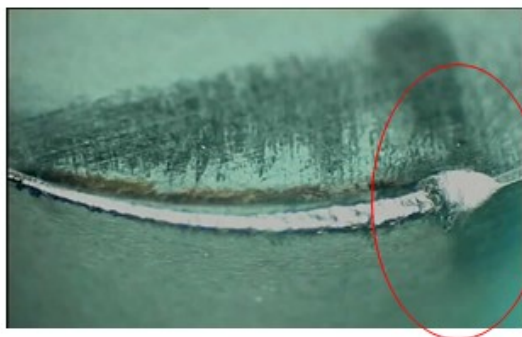
Poměr $a_p/iC$	Hloubka řezu $a_p$ pro průměr destičky v mm								Úhel nastave ní $\kappa_r$	Modifikační hodnota posuvu	Posuv min/max (mm/ot)	
	3	4	5	6	8	10	12	16			$h_{ex}$ 0.1 mm	$h_{ex}$ 0.35 mm
0.25	0.75	1	1.25	1.5	2	2.5	3	4	60°	1.16	0.12	0.41
0.2	0.6	0.8	1	1.2	1.6	2	2.4	3.2	53°	1.25	0.13	0.44
0.15	0.45	0.6	0.75	0.9	1.2	1.5	1.8	2.4	46°	1.4	0.14	0.49
0.1	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1	1.2	1.6	37°	1.66	0.17	0.58
0.05	0.15	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	26°	2.3	0.23	0.81

#### 4.5.3 Keramika – snížení opotřebení

Vzhledem ke křehkosti materiálu z keramiky je časté opotřebení při najetí nástroje do obráběného materiálu.

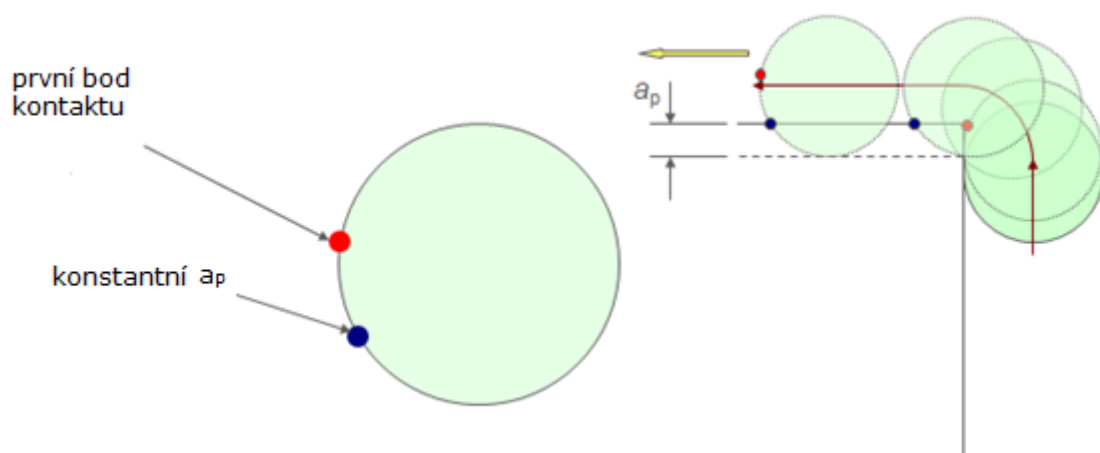
##### Možnosti snížení opotřebení:

- Snížení úhlu při vstupu nástroje do obrobku.
- Využití naprogramování vhodné techniky nájezdu.



Obr. 4.8 Poškozená keramická destička vrubem při nájezdu do materiálu [14]

U kruhových keramických destiček je možné omezit poškození řezné hrany při vstupu do materiálu vhodnou technologií nájezdu. Při vstupu je vhodné použít kruhový nájezd, kdy se mění první bod kontaktu s materiálem. Tudíž je snížené riziko k poškození destičky v hlavní řezné části konstantní hloubky řezu, zobrazeno na obr 4.9.



Obr. 4.9 Najeti kruhovou interpolací do materiálu [14]

Způsob, jak zamezit opotřebení vznikem vrubů v záběru kruhových destiček při konstantní řezné hloubce. Změna hloubky řezu, způsobující změnu kontaktního řezného bodu. Jedná se o kolísající hodnotu od 15 do 20 % průměru řezné destičky. Kruhové keramické destičky jsou schopny přijmout větší hloubku řezu než kruhové destičky ze slinutých karbidů. Jedná se o design keramických destiček, které nemají vnitřní otvor pro uchycení. Dále nižší řezné síly – nižším posuvem a vysokou rychlostí vytváří měkčí a plastičtější třísky.

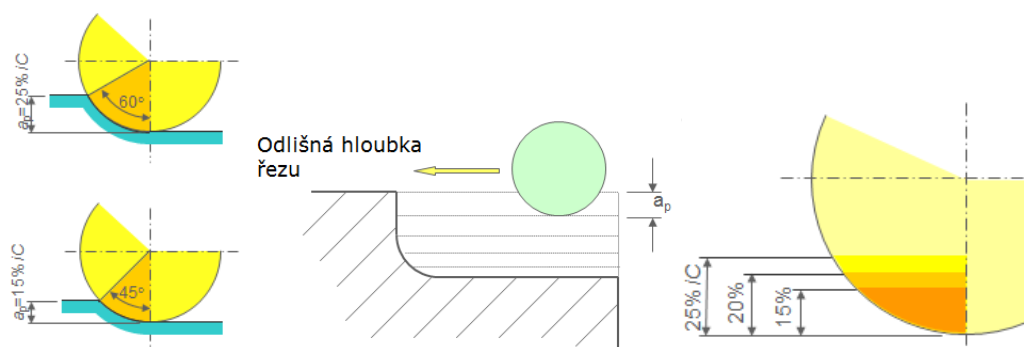
Pozitiva při více malých řezech, než jednom velkém:

- snížení tvorby otřepů,
- schopnost delší řezivosti,
- bezpečnější proces.



## I. Způsob – odlišná hloubka řezu

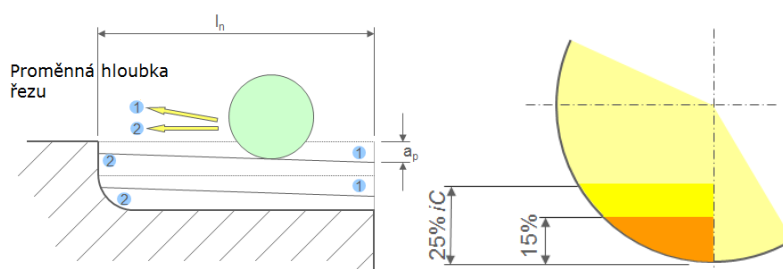
Kolísající hloubka řezu mezi 15 až 25 % průměru destičky, což změní místo řezu a úhel nastavení. Na obr. 4.10 je zobrazena hloubka řezu v rozmezí daných procent. Využití u kratších délek řezů, ideálně pro kapsování s kruhovými destičkami RNGN.



Obr. 4.10 Strategie odlišné hloubky řezu [14]

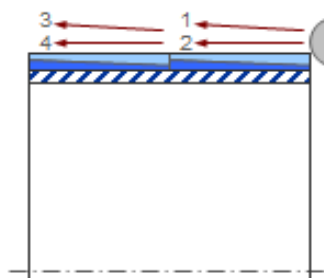
## II. Způsob – proměnná hloubka řezu

Hloubka řezu mezi 15 až 25 % průměru destičky a mění se místo řezu. Tento způsob je ideální pro větší délky řezů s kruhovými destičkami RNGN.



Obr. 4.11 Strategie proměnné hloubky řezu [14]

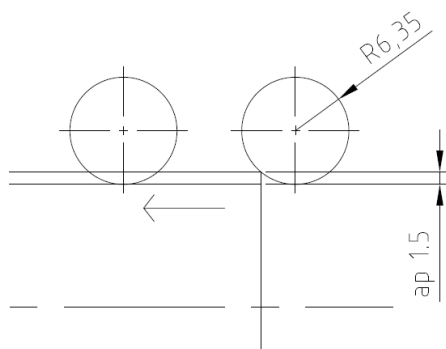
U soustružení součástí s velkým průměrem a dlouhou délkou řezu, je potřeba rozdělit dráhu na více třísek, aby se zajistila spolehlivá délka řezu. Testovaná strategie je znázorněna na obr. 4.12.



Obr. 4.12 Rozdělení řezů na více úkonů [14]

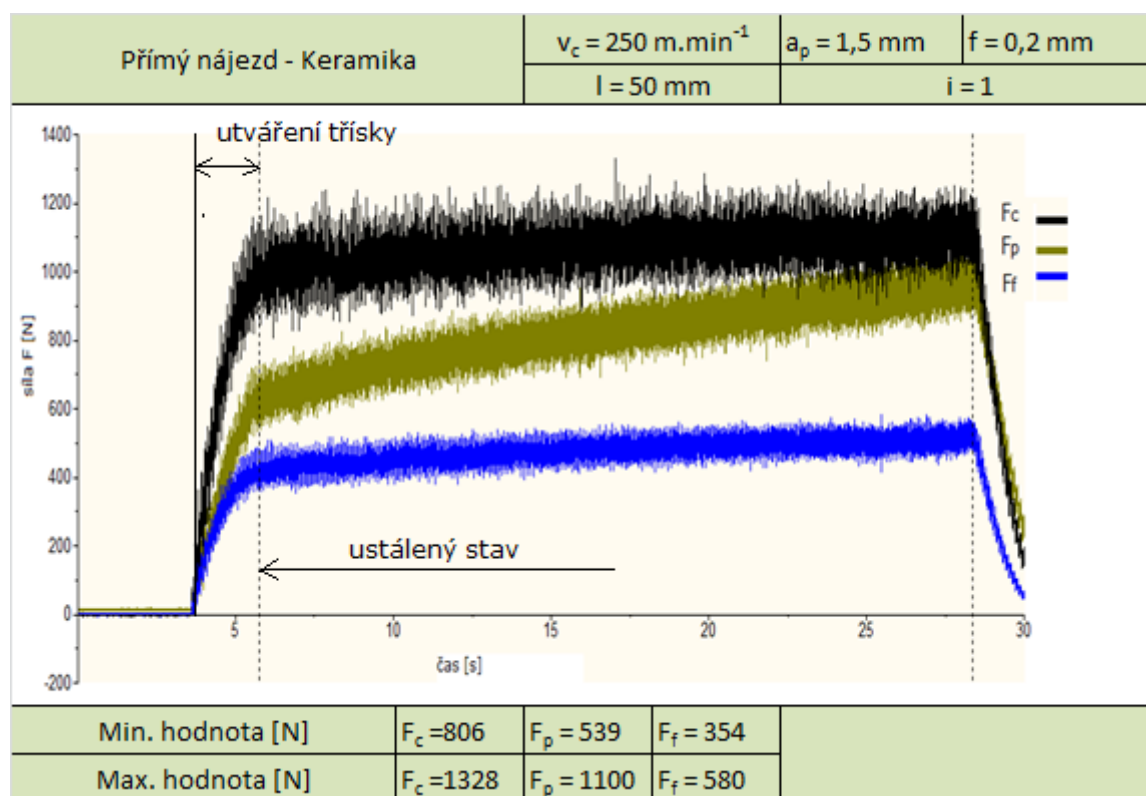
#### 4.5.4 Test 1 – Přímý nájezd

Při navrženém testu 1 se trajektorie nástroje pohybovala po přímce v konstantní hodnotě osy X. Na obr. 4.13 je tato trajektorie znázorněna schematicky.



Obr. 4.13 Přímý nájezd nástroje

Tab. 4.6 grafické zobrazení sil při přímém náběhu



V grafickém zobrazení 4.6 je vidět rovnoměrný náběh sil v prvotní fázi utváření třísky (náběhu do materiálu). Následně se stav ustálí s konstantní hloubkou řezu  $a_p = 1,5 \text{ mm}$ . Ve fázi podélného vnějšího soustružení jde vidět vzrůstající pasivní složku síly. Ostatní složky  $F_c$  a  $F_f$  zůstávají téměř na kolem stejné hodnoty.

**Střední hodnoty jednotlivých složek sil:**

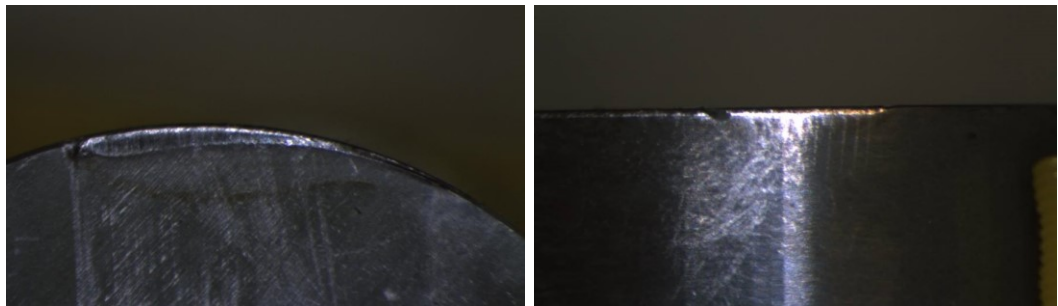
$$F_c = 1067 \text{ N}; \quad F_p = 819,5 \text{ N}; \quad F_f = 467 \text{ N}$$

Po dosazení do vzorce 4.3 získáme výslednici síly řezání  $F_v$ :

$$\text{Dle vztahu: } F_v = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} \quad (4.3)$$

$$F_v = \sqrt{1067^2 + 467^2 + 819,5^2}$$

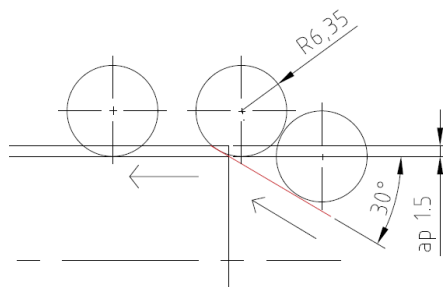
$$F_v = 1424 \text{ N}$$



*Obr. 4.14 Vizuelní opotřebení keramické VBD.*

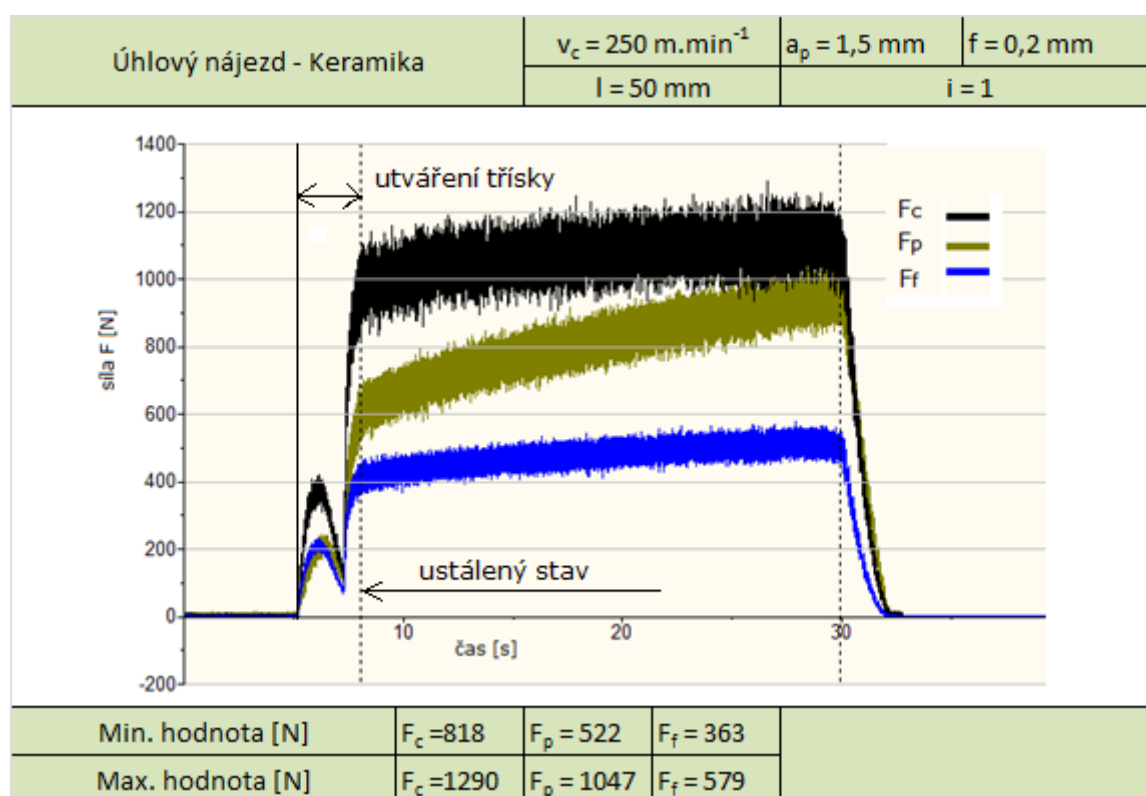
#### 4.5.5 Test 2 – Nájezd pod úhlem

Při navrženém testu 2 se trajektorie nástroje při nájezdu do materiálu pohybovala pod úhlem  $30^\circ$ , což změní místo prvního kontaktního bodu nástroje s materiálem. Na obr. 4.15 je tato trajektorie schematicky znázorněná. Změna prvního místa kontaktu dokáže ovlivnit životnost nástroje omezením rizika vzniku vrubu v destičce.



Obr. 4.15 Nájezd nástroje pod úhlem  $30^\circ$

Tab. 4.7 grafické zobrazení sil při úhlovém náběhu



Při náběhu nástroje do materiálu pod úhlem  $30^\circ$  je na grafickém znázornění tab. 4.7 vidět vzrůstající náběh sil s náhlým poklesem a následně opětovný náběh všech sil až do ustáleného stavu. Zde jde o případ, kdy nástroj bere část obrobku pod úhlem, kde je větší tloušťka třísky než u podélného směru. Při změně pohybu na podélný posuv bere nástroj menší tloušťku třísky od jiné hodnoty. Dále je průběh sil stejný při konstantní  $a_p$ .

**Střední hodnoty jednotlivých složek sil:**

$$F_c = 1054 \text{ N}; \quad F_p = 784,5 \text{ N}; \quad F_f = 471 \text{ N}$$

Po dosazení do matematického vyjádření 4.3 získáme výslednou hodnotu  $F_v$ .

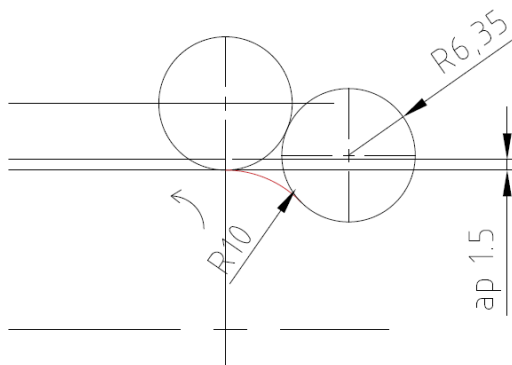
$$F_v = 1395,7 \text{ N}$$



*Obr. 4.16 Vizuální opotřebení keramické VBD.*

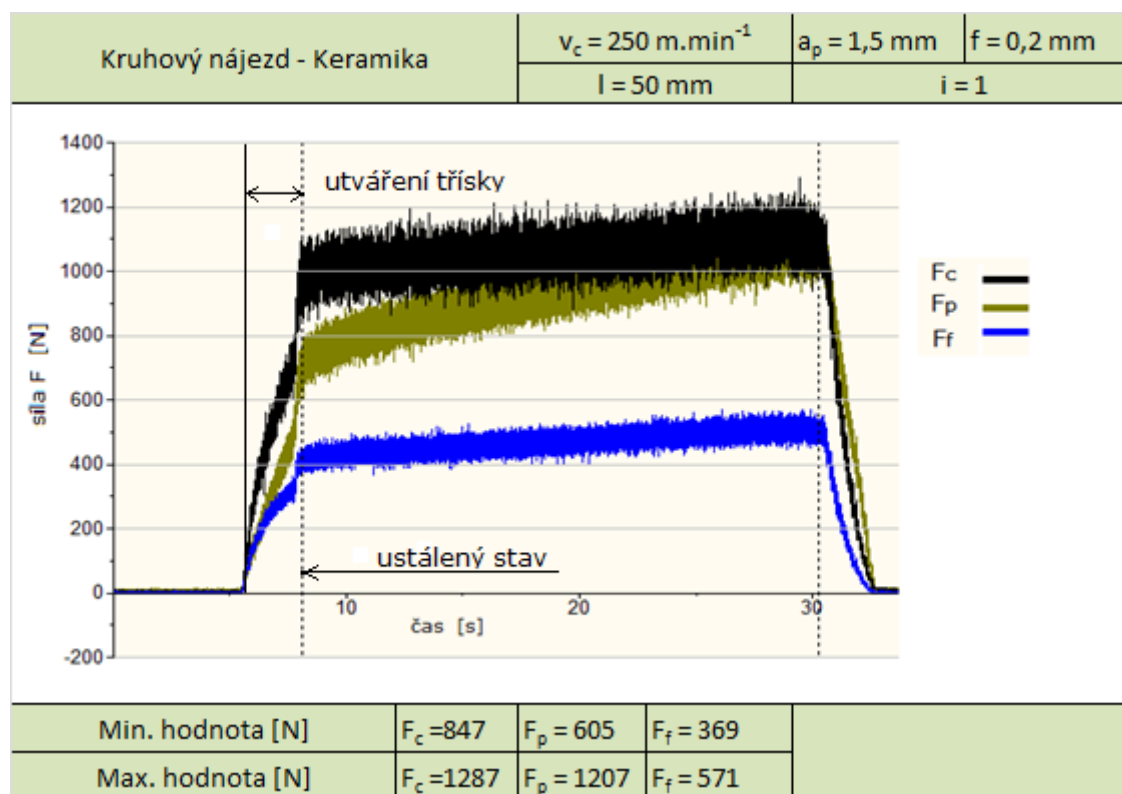
#### 4.5.6 Test 3 – Nájezd pod rádiusem

Při navrženém testu 3 se trajektorie nástroje při nájezdu do materiálu pohybovala kruhovou interpolací s 10mm poloměrem, opět se změnil místo prvního kontaktního bodu nástroje s materiálem. Na obr. 4.17 je tato trajektorie schematicky znázorněna. Změna tohoto místa dokáže ovlivnit životnost nástroje omezením rizika vzniku vrubu v destičce.



Obr. 4.17 Nájezd nástroje pod rádiusem R10

Tab. 4.8 grafické zobrazení sil při kruhové nájezdu



Při nájezdu nástroje do materiálu pod rádiusem je výhoda v místě bodu prvního kontaktu nástroje s obrobkem. Tento bod se postupně posouvá až po danou hloubku řezu, čímž by nemělo dojít k vytvoření vrubu na nástroji v daném místě. Dále je průběh sil stejný při konstantní  $a_p$ .

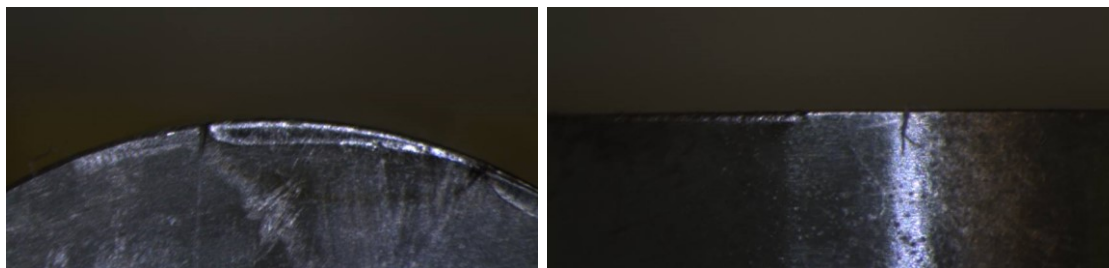
**Střední hodnoty jednotlivých složek sil:**

$$F_c = 1067 \text{ N}; \quad F_p = 906 \text{ N}; \quad F_f = 470 \text{ N}$$

Výslednice síly řezání  $F_v$ :

Po dosazení do matematického vyjádření 4.3 získáme výslednou hodnotu  $F_v$ .

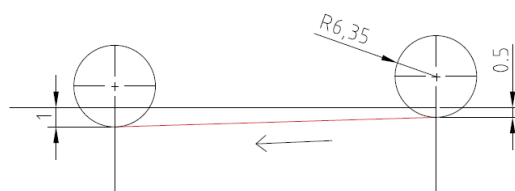
$$F_v = 1476,6 \text{ N}$$



*Obr. 4.18 Vizuální opotřebení keramické VBD*

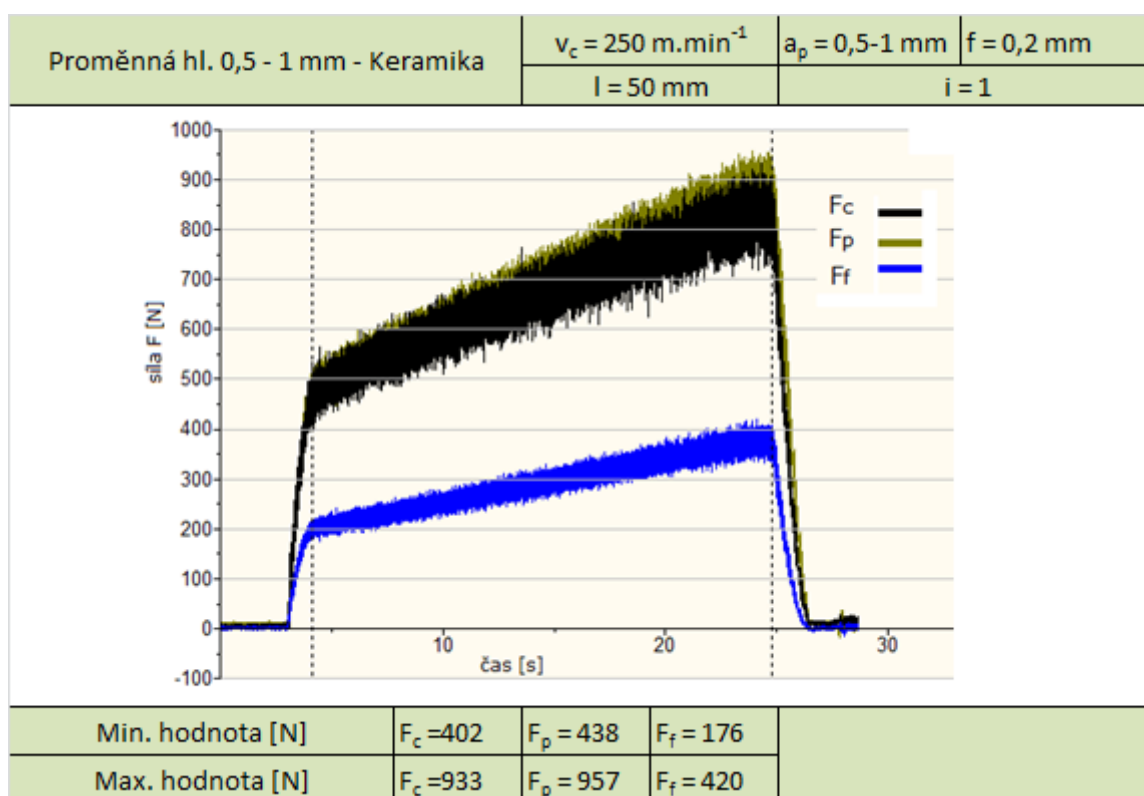
#### 4.5.7 Test 4 – Proměnná hloubka podélného řezu 0,5 – 1 mm

Kvůli malé životnosti nástroje v konstantní hloubce řezu, kdy vznikají vruby v řezné části, byl navržen 4. test s proměnnou hloubkou  $a_p$ . Trajektorie této strategie je znázorněná na obr. 4.19, kde hloubka řezu narůstá mezi danými hodnotami. Proměnná hloubka ovlivní při větším počtu cyklů životnost nástroje, díky neustálé změně kontaktního řezného bodu.



Obr. 4.19 Proměnná hloubka podélného řezu 0,5 – 1 mm

Tab. 4.9 grafické zobrazení sil při proměnné hloubce řezu 0,5 – 1 mm



Síly při obrábění proměnné hloubky řezu kdy se jedná o počátek řezné hloubky  $a_p = 0,5 \text{ mm}$  do konečné hloubky  $a_p = 1 \text{ mm}$ . Na grafickém znázornění tab. 4.9 je vidět, že pasivní složka  $F_p$  mírně převyšuje hodnotu řezné síly  $F_c$ . Zde jde o případ, kdy nástroj působí větší radiální silou na obrobek, tedy ve směru pasivní složky  $F_p$  a nástroj se „snaží



vtlačit“ do obrobku, poté narůstá hodnota  $F_p$ . Vzhledem k vzrůstající hloubce řezu  $a_p$  rostou všechny tři složky sil zároveň.

#### Střední hodnoty jednotlivých složek sil:

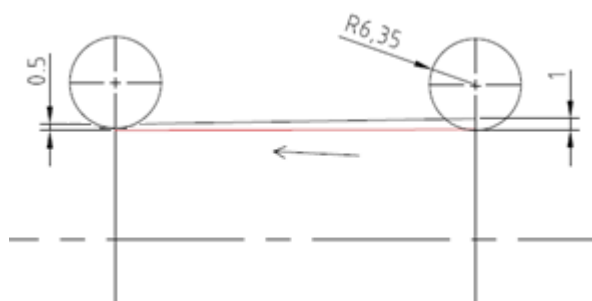
$$F_c = 667,5 \text{ N}; \quad F_p = 697,5 \text{ N}; \quad F_f = 298 \text{ N}$$

Výslednice síly řezání  $F_v$ :

Po dosazení do matematického vyjádření 4.3 získáme výslednou hodnotu  $F_v$ .

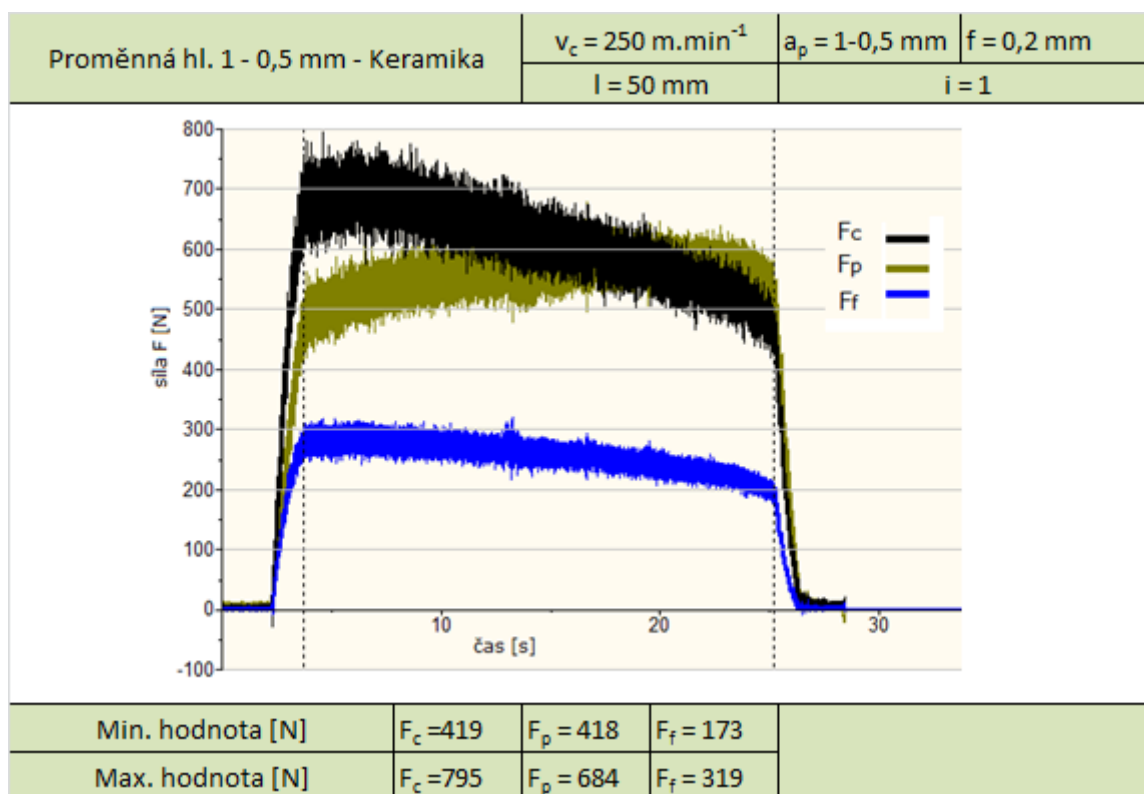
$$F_v = 1010 \text{ N}$$

#### Proměnná hloubka podélného řezu 1–0,5 mm



Obr. 4.20 Proměnná hloubka podélného řezu 1–0,5mm

Tab. 4.10 grafické zobrazení sil při proměnné hloubce řezu 1–0,5mm



Při zarovnání kuželové plochy z předchozího případu, lze vidět na grafickém znázornění tab. 4.10 rozdíl ve složce pasivní síly  $F_p$ . Jedná se o to, že nástroj v tomto případě má souběžnou trajektorii s osou obrobku. I přes změnu hloubky zmenšující se  $a_p$ , pasivní síla se pohybuje kolem střední hodnoty tj. 550 N. Řezná síla  $F_c$  a posuvová síla  $F_f$  konstantě klesají s klesající hloubkou řezu  $a_p$ .

V porovnání s proměnnou hloubkou řezu mezi rostoucí  $a_p$  a klesající  $a_p$ , jsou výsledné síly rozdílné o 154 N. Z grafů je zřejmé, že největší význam v tomto rozdílu má složka pasivní síly  $F_p$ .

#### **Střední hodnoty jednotlivých složek sil:**

$$F_c = 607 \text{ N}; \quad F_p = 551 \text{ N}; \quad F_f = 246 \text{ N}$$

Výslednice síly řezání  $F_v$ :

Po dosazení do matematického vyjádření 4.3 získáme výslednou hodnotu  $F_v$ .

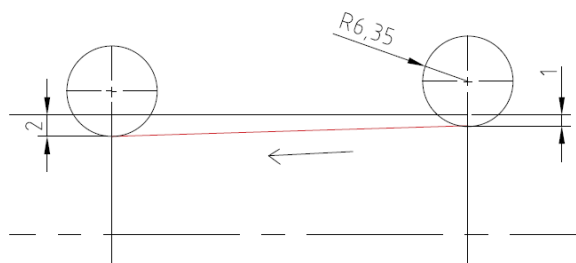
$$F_v = 856 \text{ N}$$



*Obr. 4.21 Vizualní opotřebení keramické VBD.*

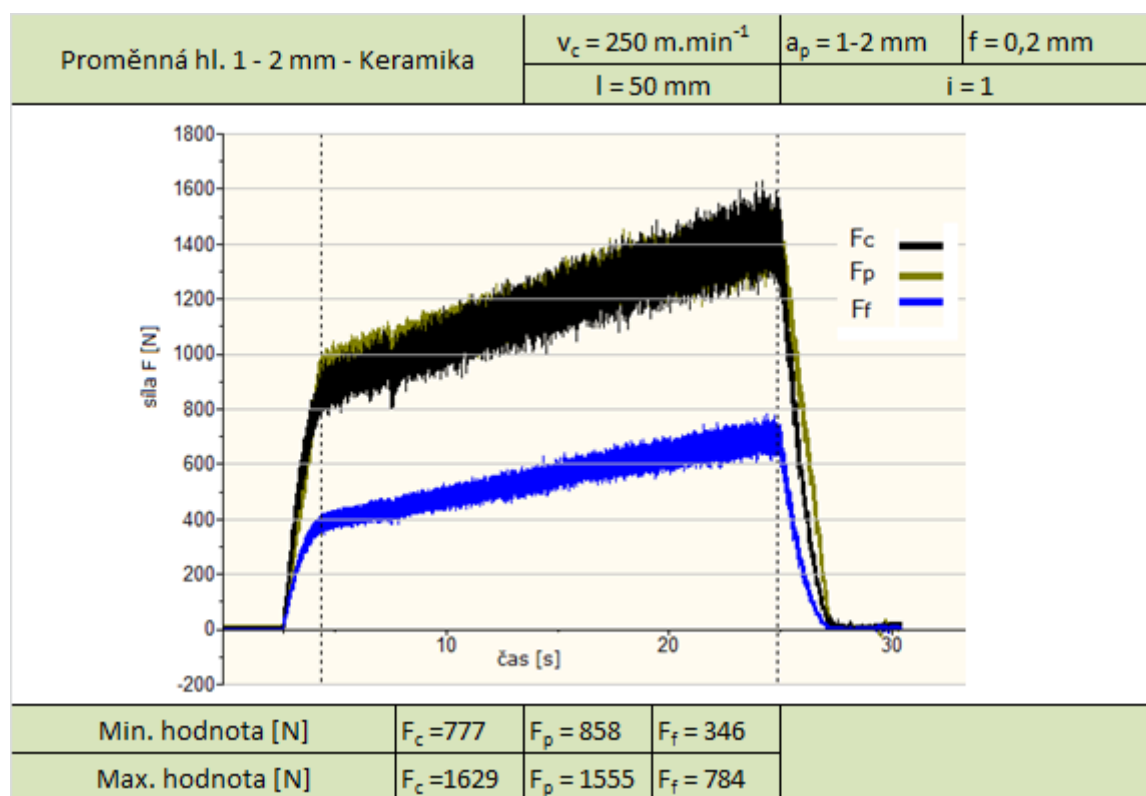
#### 4.5.8 Test 5 – Proměnná hloubka podélného řezu 1–2 mm

Zde se jedná o stejný případ jako při 4. testu. Hloubka řezu je v tomto případě dvojnásobná. Trajektorie nástroje je schematicky znázorněná na obr. 4.22.



Obr. 4.22 Proměnná hloubka podélného řezu 1–2mm

Tab. 4.11 grafické zobrazení sil při proměnné hloubce řezu 1–2mm



Obdobný případ viz tab. 4.9 proměnná hloubka 0,5 – 1 mm. Pouze hodnoty sil jsou větší v závislosti na hloubce řezu  $a_p$ .

**Střední hodnoty jednotlivých složek sil:**

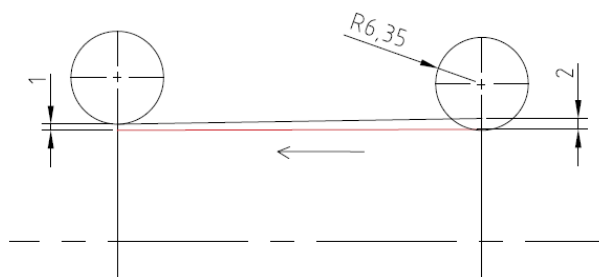
$$F_c = 1203 \text{ N}; \quad F_p = 1206,5 \text{ N}; \quad F_f = 565 \text{ N}$$

Výslednice síly řezání  $F_v$ :

Po dosažení do matematického vyjádření 4.3 získáme výslednou hodnotu  $F_v$ .

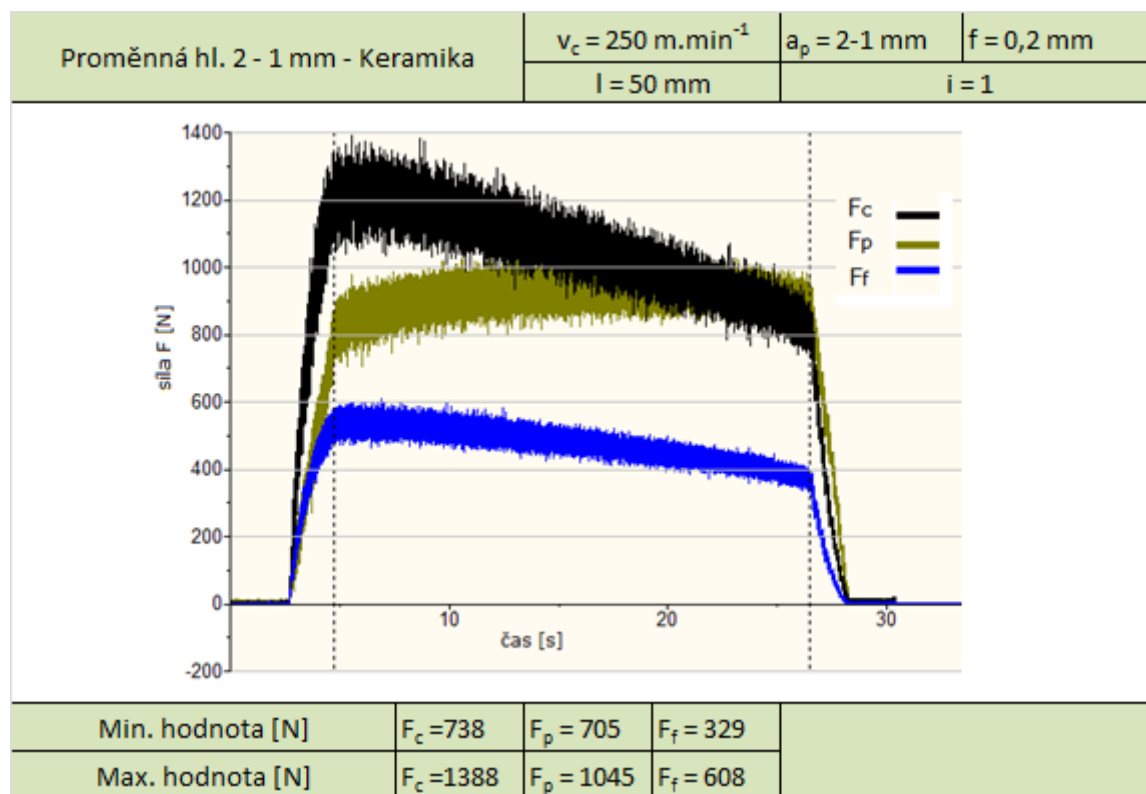
$$F_v = 1795 \text{ N}$$

### Proměnná hloubka podélného řezu 2 - 1 mm



Obr. 4.23 Proměnná hloubka podélného řezu 2 – 1mm

Tab. 4.12 grafické zobrazení sil při proměnné hloubce řezu 2 - 1mm



Obdobný případ viz tab. 4.10 proměnná hloubka 1 – 2 mm. Pouze hodnoty sil jsou také větší v závislosti na hloubce řezu  $a_p$ . Opět je vidět rozdíl v pasivní složce síly s rostoucí se hloubkou řezu a klesající hloubkou řezu.

V porovnání s proměnnou hloubkou řezu mezi rostoucí  $a_p$  a klesající  $a_p$ , jsou výsledné síly rozdílné o 340,7 N. Z grafů je zřejmé, že největší význam v tomto rozdílu má opět pasivní složka síly  $F_p$ .

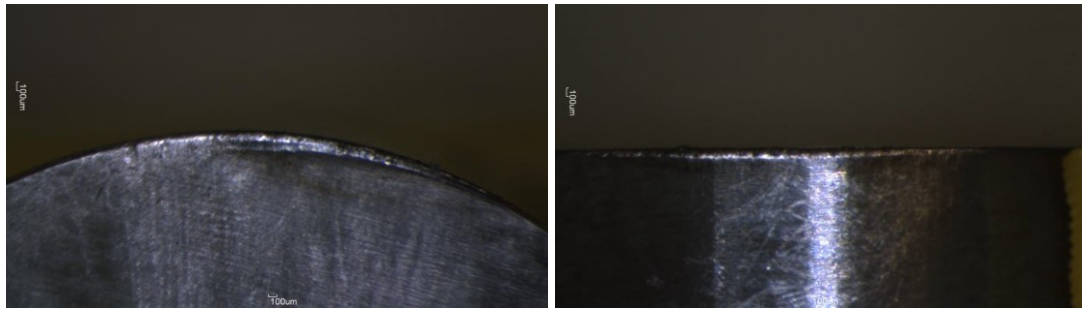
**Střední hodnoty jednotlivých složek sil:**

$$F_c = 1063 \text{ N}; \quad F_p = 875 \text{ N}; \quad F_f = 468,5 \text{ N}$$

Výslednice síly řezání  $F_v$ :

Po dosazení do matematického vyjádření získáme výslednou hodnotu  $F_v$ .

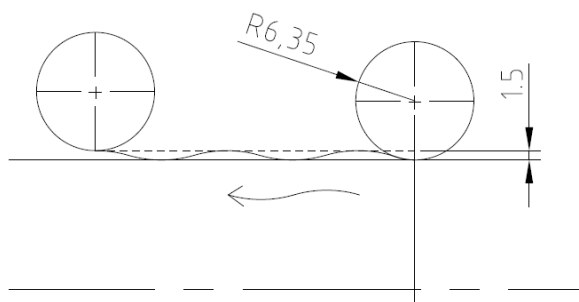
$$F_v = 1454,3 \text{ N}$$



*Obr. 4.24 Vizuální opotřebení keramické VBD*

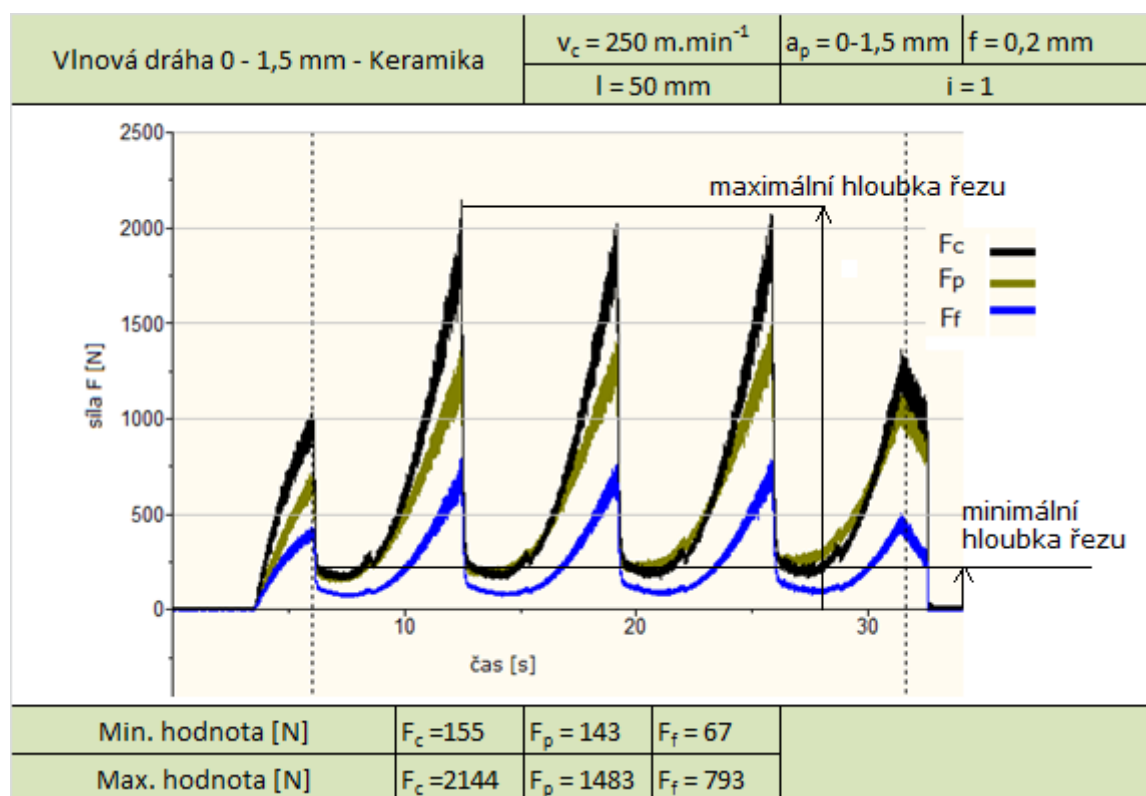
#### 4.5.9 Test 6 – Vlnová dráha nástroje

Při navrženém testu 6, se jedná o to, aby se kontaktní řezný bod neustále měnil. Navržená trajektorie nástroje pohybující se po vlnové dráze viz obr. 4.25 s poloměrem 6,35 mm, který je totožný s poloměrem VBD a maximální hloubkou řezu 1,5 mm.



Obr. 4.25 Vlnová dráha nástroje

Tab. 4.13 grafické zobrazení sil při vlnové dráze nástroje



Na grafickém zobrazení tab. 4.13 jsou znázorněny síly, vzniklé při navržené trajektorii nástroje v podobě vlnové dráhy. Jednalo se o poloměr rádiusu stejným jako poloměrem břitové destičky, tedy 6,35 mm. Hloubka třísky se pohybovala v rozmezí 0 – 1,5 mm. V tomto případě se jedná o neustále pohybující se kontaktní bod řezné destičky. Na grafu je vidět nedoběhlé síly k maximu, jedná se o první a poslední periodu, jelikož dráha byla omezena délkou polotovaru a hloubka řezu se nedostala do požadované hodnoty 1,5 mm.

Náhly pokles sil způsobila hloubka řezu, která se v danou chvíli přiblížila k nulové hodnotě, postupně se začaly síly úměrně zvětšovat s hloubkou třísky  $a_p$ .

#### Střední hodnoty jednotlivých složek sil:

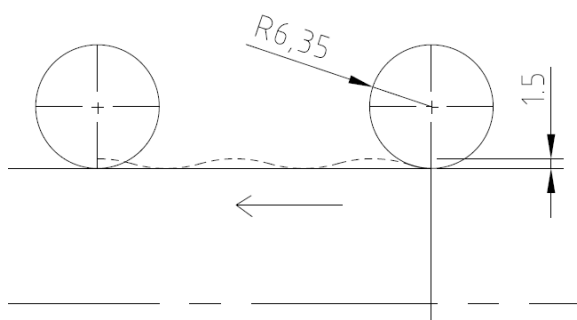
$$F_c = 1149,5 \text{ N}; \quad F_p = 813 \text{ N}; \quad F_f = 430 \text{ N}$$

Výslednice síly řezání  $F_v$ :

Po dosazení do matematického vyjádření získáme výslednou hodnotu  $F_v$ .

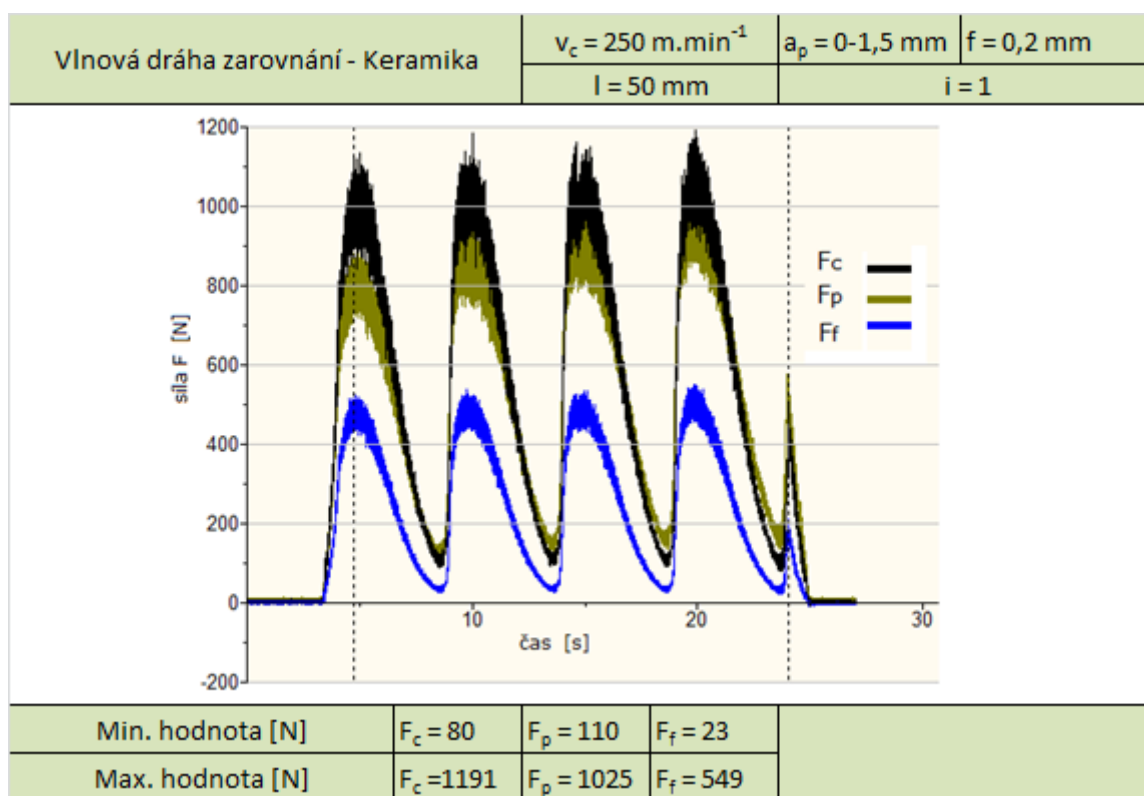
$$F_v = 1472 \text{ N}$$

#### Vlnová dráha nástroje (zarovnání)



Obr. 4.26 Zarovnání vlnové dráhy nástroje

Tab. 4.14 grafické zobrazení sil při zarovnání polotovaru vlnovitého tvaru



Při zarovnání obrobku vlnovitého tvaru (obr. 4.28), jsou znázorněny síly, které mají vysoký náběh při zvyšující se hloubce řezu až po  $a_p = 1,5$  mm. Při této hodnotě dosahují svého maxima, s postupným snižováním  $a_p$  k nulové hodnotě všechny složky klesají s opětovným vzrůstem sil.

Výsledné síly v porovnání s vlnovou dráhou a přímou dráhou nástroje při zarovnání vlnové plochy jsou rozdílné o 573,3 N. Tento rozdíl způsobují vysoké síly při max. hloubce řezu u vlnové dráhy. Destička se dotýká v tomto místě velikou kontaktní plochou obrobku, což způsobuje vysoký řezný odpor. Při tomto pohybu má také veliký vliv pasivní složka  $F_p$ , která působí na materiál větší silou.

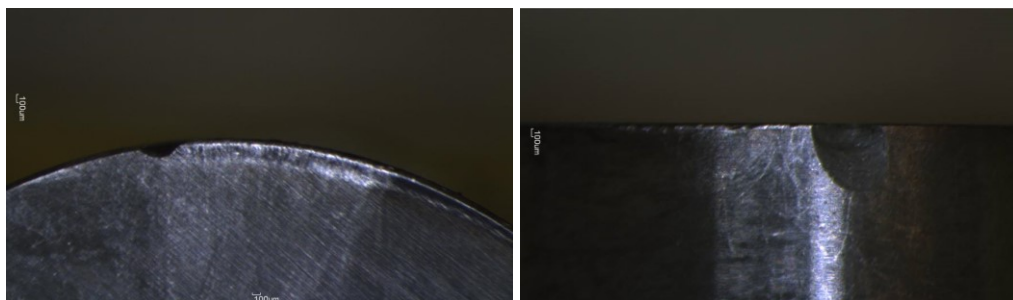
#### **Střední hodnoty jednotlivých složek sil:**

$$F_c = 635,5 \text{ N}; \quad F_p = 567,5 \text{ N}; \quad F_f = 286 \text{ N}$$

Výslednice síly řezání  $F_v$ :

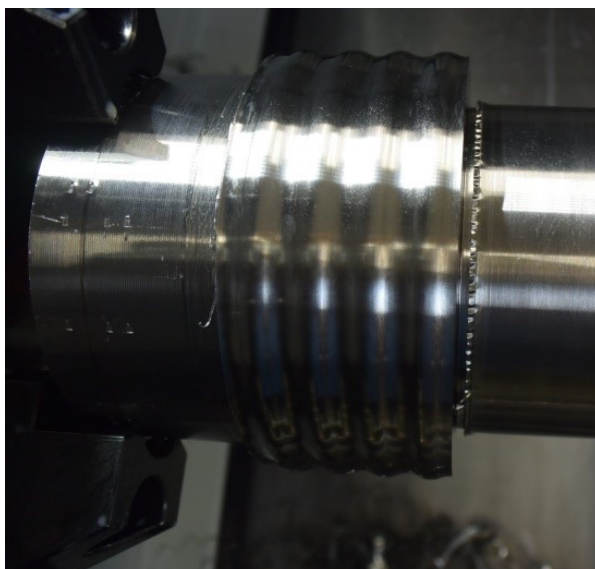
Po dosazení do vzorce matematického vyjádření získáme výslednou hodnotu  $F_v$ .

$$F_v = 898,7 \text{ N}$$



*Obr. 4.27 Vizuální opotřebení keramické VBD*





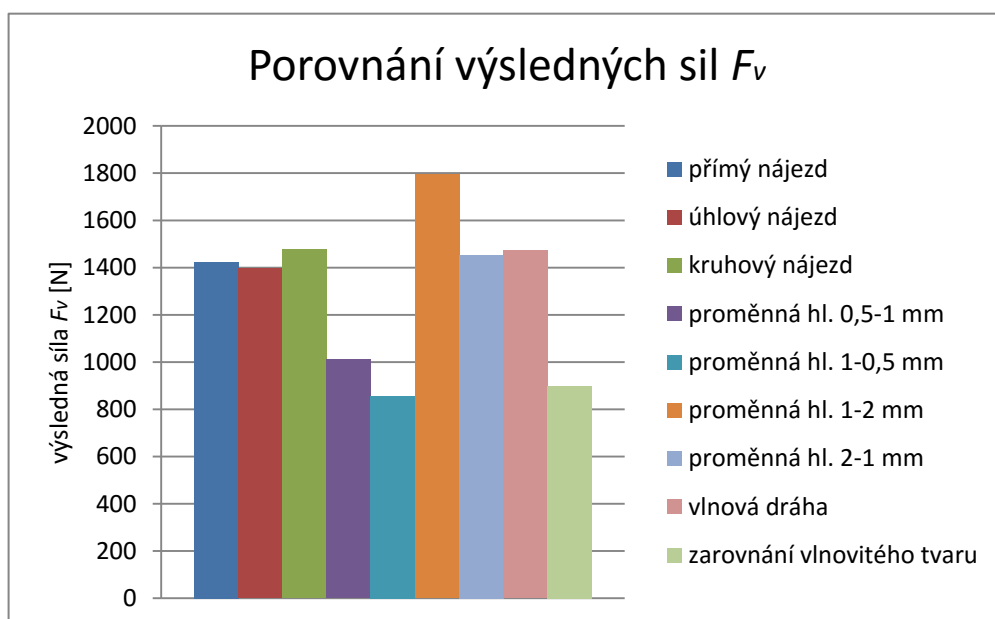
*Obr. 4.28 Obrobený materiál vlnovou dráhou nástroje*

#### **4.5.10 Porovnání výsledných sil**

Vzhledem k odlišným strategiím byly z každého testování vypočítány výsledné síly působící na nástroj při soustružení. V tab. 4.15 jsou jednotlivé síly testů vypsány s výslednou hodnotou síly  $F_v$ . V grafickém zobrazení 4.1 jsou vyneseny výsledné síly a porovnány mezi jednotlivými strategiemi. V porovnání s určitými případy je výsledná síla dvojnásobná, což způsobila odlišná hloubka řezu  $a_p$ . Konkrétně mezi proměnnými hloubkami a vlnovou dráhou nástroje. Jak je již v předchozích případech zmíněno, určité rozdíly způsobila pasivní složka řezné síly při změnách trajektorie nástroje. Při srovnání sil v odlišných nájezdech nástroje jsou rozdíly hodnot téměř zanedbatelné, pouze u nájezdu pod rádiusem je výsledná síla o něco vyšší, což také způsobila pasivní složka řezné síly ve směru osy X.

Tab. 4.15 výsledky naměřených hodnot

střední hodnoty sil a výslednice $F_v$ [N]	$F_c$	$F_p$	$F_f$	$F_v$
přímý nájezd	1067	819,5	467	<b>1424</b>
úhlový nájezd	1054	784,5	471	<b>1395,7</b>
kruhový nájezd	1067	906	470	<b>1476,6</b>
proměnná hl. 0,5-1 mm	667,5	697,5	298	<b>1010</b>
proměnná hl. 1-0,5 mm	607	551	246	<b>856</b>
proměnná hl. 1-2 mm	1203	1206,5	565	<b>1795</b>
proměnná hl. 2-1 mm	1063	875	468,5	<b>1454,3</b>
vlnová dráha	1149,5	813	430	<b>1472</b>
zarovnání vlnovitého tvaru	635,5	567,5	286	<b>898,7</b>



Graf. 4.1 porovnání výsledných sil

## Závěr

Tato diplomová práce je zaměřená na třískové obrábění niklové superslitiny Inconel 625. Vzhledem k vlastnostem této slitiny se proces obrábění částečně liší od obrábění běžných kovových materiálů. Byla zpracována analýza současného stavu obrábění Ni slitin a jejich chování při třískovém obrábění. Zhoršená obrobiteľnosť, tepelně-deformační zpevňování, mikrostruktura apod. jsou faktory, které ovlivňují tyto procesy. Je potřeba při těchto nepříznivých faktorech volit vhodnou technologii, vhodnou volbu nástroje, úpravu řezných parametrů a v neposlední řadě použití procesní kapaliny, aby byly příznivější podmínky pro obrábění těchto materiálů.

Experimentální část byla zaměřena na návrh rozdílných soustružnických strategií s porovnáním výsledných sil. K měření složek řezných sil byl zajištěn dynamometr KISTLER 9129AA, který byl namontován do speciálního držáku pro revolverové hlavy. Jelikož se jedná o niklovou slitinu, byla pro testování zvolená keramická destička včetně nožového držáku firmy SANDVIK. Také svou konstrukci a tuhosti zvolen obráběcí stroj – soustružnické centrum DMG MORI NLX2500, který je vhodný k obrábění materiálů ze speciálních slitin a těžkoobrobitelných materiálů. Řezné podmínky byly voleny v rozmezí daném výrobcem s mírnou úpravou řezné rychlosti a minimální hodnotou posuvu.

Obrábění této slitiny proběhlo v laboratoři areálu VŠB – Technické univerzity Ostrava. Navržené strategie byly naprogramovány a provedeny jednotlivě. Mezi jednotlivými návrhy se měnila trajektorie nástroje a hloubka řezu. Pro každou strategii byly zpracovány a vyhodnoceny výsledky včetně vykreslených grafů v závislosti na čase obrábění. Z vykreslených grafů jsou vyčtené minimální a maximální hodnoty sil řezných složek, ze kterých byly vypočítány výslednice síly  $F_v$ . Zkoumaly se průběhy sil při nájezdech nástroje do materiálu ve třech variantách, dále průběhy podélného soustružení navržených strategií. Mezi jednotlivými výsledky byly srovnány vypočtené výslednice a jejich rozdíly. Po každém testování byla břitová destička vyjmuta, která se následně zkoumala a fotograficky zachytila pod mikroskopem.

Vzhledem ke kvalitativním výsledkům a k ekonomické hospodárnosti výroby mohou být tato měřítka přínosná díky zvýšení životnosti nástroje, která se vhodnou technologií obrábění může v časovém měřítku řádově navýšit.

*Práce byla podpořena ze Studentské grantové soutěže Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava v rámci projektu SP2016/172 Vliv technologických parametrů na obrobený povrch a SP2016/174 Studium procesu obrábění progresivních materiálů s cílem zvýšit a podpořit vědecko-výzkumné aktivity studentů doktorských a magisterských studijních programů ve spolupráci s akademickými pracovníky.*

## Seznam použité literatury

- [1] NESLUŠAN, M.; CZÁN, A. Obrábanie titánových zliatin. Žilina : Žilinská univerzita v Žilíně / EDIS. 2001. 189 s. ISBN 80-7100-933-4
- [2] DARECKÝ, J. *Superzliatiny niklu a ich obrábanie*. Žilina : Žilinská univerzita v Žilíně / EDIS. 2001. 189 s. ISBN 80-7100-785-4.
- [3] Příručka pro technology - Obrobitelnost. In: *MM průmyslové spektrum* [online]. Praha: Redakční systém, SEO a webdesign od AG TOP TIP, 2011 [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-obrobitelnost.html>>
- [4] CILEČEK, M. *Testování břitových destiček při obrábění materiálu Inconel 625*. Ostrava, 2013.
- [5] Sandvik Coromant s.r.o. *Skupiny obráběných materiálů*. [online], [cit. 2016-05-03]. Dostupné na WWW:<[http://www.sandvik.coromant.com/cs\\_cz/knowledge/materials](http://www.sandvik.coromant.com/cs_cz/knowledge/materials)>
- [6] *Obrábění materiálů s velkou pevností a tvrdostí*. Praha 1: Nakladatelství technické literatury, n. p., 1982.
- [7] SECO Tools. *The essential material characteristics of Inconel* [online]. Sweden [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: <<https://www.secotools.com/en/Global/Segment-Solutions/Aerospace-Solutions/AS-Material-main/Heat-resistant-super-alloys/Inconel-71874/>>
- [8] Řezná keramika a kubický nitrid boru. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2003 [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/rezna-keramika-a-kubicky-nitrid-boru.html>>
- [9] [NESLUŠAN, M.: Sústružení kalených ocelí, Edis Žilina 2009, ISBN 978-80-554104-1].
- [10] VRAŠTIL, M. *Silové poměry při tvrdém soustružení*. Ostrava, 2012. Disertační práce. Vedoucí práce Brychta, J.
- [11] SADÍLKOVÁ, Z. *Efektivní strategie při soustružení*. Ostrava, 2015. Disertační práce. Vedoucí práce Brychta, J.

- [12] SANDVIK Coromant. *Řezná keramika* [online]. [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: <<http://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/brochures/cs-cz/c-2929-61.pdf>>
- [13] SANDVIK Coromant: *Heat resistant super alloys*. Sweden. [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: <<http://www.sandvik.coromant.com/en-gb/pages/default.aspx>>
- [14] SANDVIK COROMANT. *General Turning*. 2011. [Online] [cit. 201-05-5]. Dostupné z: <<https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge>>
- [15] LAPERRIERE, L. *CIRP encyclopedia of production engineering*. New York: Springer, 2013. ISBN 9783642206184.
- [16] ZLÁMAL, T. *Příspěvek k obrábění Ni superslitiny a hodnocení řezivosti vybraných řezných materiálů*. Ostrava, 2015. Disertační práce.
- [17] KISTLER GROUP. 2009. *Cutting Force Measurement*. Soubor v PDF. [cit. 2016-05-2]. Dostupné z: <<http://www.kistler.com>>
- [18] SANDVIK Coromant. *CRDNN 2525M 12-ID shank tool for turning* [online]. [cit. 2016-05-06]. Dostupné z: <<http://www.sandvik.coromant.com/en-gb/products/pages/productdetails.aspx?c=CRDNN%202525M%2012-ID&m=5726138>>
- [19] Specialmetals.com [online]. c2009 [cit. 2016-04-22]. *Machinig Special Metals Corporation Products*. Dostupné z: <<http://www.specialmetals.com/documents/machining.pdf>>
- [20] SANDVIK Coromant. *RNGN120700T01020 670 Břitové destičky T-Max® pro soustružení* [online]. [cit. 2016-05-06]. Dostupné z: <<http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/Pages/productdetails.aspx?c=rng45t0320+670&Country=cz#/?active=detail>>
- [20] HUMÁR, A. *Technologie I – technologie obrábění – sylabus*. Brno: VUT Brno, 2003 [cit. 2015-06-02]. Dostupné z: <<http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/page=opory>>
- [21] HAJNYŠ, J. *Obrábění těžkoobrobitelných materiálů*. Ostrava, 2015. Diplomová práce. Vedoucí práce Petrů, J.